



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Mecánica

PROYECTO FIN DE CARRERA

SIMULACIÓN POR ORDENADOR DEL PASO POR OBSTÁCULOS DE UN VEHÍCULO TERRESTRE NO TRIPULADO

Autor: Leticia Robles San Martín

Tutor: Jesús Meneses Alonso

Leganés, 23 de octubre de 2015

Título: Simulación por ordenador del paso por obstáculos de un vehículo terrestre no tripulado

Autor: Leticia Robles San Martín

Director: Jesús Meneses Alonso

EL TRIBUNAL

Presidente: Cristina Castejón Sisamón

Vocal: Eduardo Corral Abad

Secretario: Juan Antonio Baratas Moreno

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 23 de octubre de 2015 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

A mis padres y a mi hermana, por hacer posible que haya llegado hasta aquí y que sea la persona que hoy soy.

Al resto de mi familia, y a los que sin serlo se comportan como tal, por su preocupación y atención.

A mis amigos, por el apoyo, los tirones de orejas y los buenos momentos compartidos.

A mi tutor en este proyecto, por conseguir que me ilusionase, por su paciencia y por su ayuda.

A Unai, por empezar y acabar esta aventura a mi lado... y por todas las aventuras juntos que están por venir.

Resumen

En los últimos años, el diseño y desarrollo de vehículos no tripulados ha formado parte de las principales líneas de trabajo en el campo de la ingeniería mecánica. Su capacidad para actuar en zonas inaccesibles o peligrosas para el ser humano los dota de grandes ventajas aplicables a diferentes entornos de actividad.

A lo largo de este proyecto se ha estudiado un modelo concreto de vehículo terrestre no tripulado (UGV) que cuenta con la particularidad de tener las ruedas unidas al cuerpo mediante unas barras articuladas que permiten modificar su posición. Haciendo uso de un software comercial se han realizado múltiples simulaciones cuasiestáticas y dinámicas del paso por obstáculos de dicho vehículo. Durante las simulaciones se ha ido modificando la configuración de posición del vehículo así como las características de los obstáculos, con el objetivo principal de estudiar su influencia en el movimiento y poder ofrecer una configuración que permita al UGV realizar el paso del obstáculo aplicando un par lo más bajo posible, optimizando así su consumo.

Finalmente, se analizarán los resultados obtenidos en las simulaciones y se mostrará la configuración de posición recomendada que debe adoptar el vehículo para cada uno de los casos estudiados.

Palabras clave: UGV, simulación, cuasiestática, dinámica, obstáculo, par, configuración.

Abstract

In recent years, the design and development of unmanned vehicles has been part of the main lines of work in the field of mechanical engineering. Its ability to act in areas that are inaccessible or dangerous to humans endows them with great advantages applicable to different activity environments.

Throughout this project, a particular model of unmanned ground vehicle (UGV) has been studied, which has the distinction of having the wheels attached to the body by jointed bars that allow it to change its position. Using a commercial software many quasi-static and dynamic simulations have been made about the vehicle going over different obstacles. During the simulations the configuration of the vehicle and the characteristics of the obstacles have been modified, with the main aim of study their influence on the movement and offer a configuration that allows the UGV carry over the obstacle with the lowest torque, thus optimizing consumption.

Finally, the results of the simulations will be analysed and the recommended configuration of position to be taken by the vehicle for each of the studied cases will be shown.

Keywords: UGV, simulation, quasi-static, dynamic, obstacle, torque, configuration.

Índice general

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Fases del proyecto	3
1.4 Medios empleados.....	4
1.4.1 <i>Working Model 2D</i>	4
1.4.2 <i>Microsoft Excel</i>	4
1.4.3 <i>Microsoft Word</i>	4
1.5 Estructura de la memoria	5
2. PRESENTACIÓN DEL UGV	7
2.1 Estado del arte	7
2.2 Dimensiones del UGV	8
2.3 Representación en Working Model.....	10
2.3.1 <i>Estructura del UGV</i>	10
2.3.2 <i>Unión de elementos</i>	11
2.3.3 <i>Superficie</i>	12
3. SIMULACIONES CUASIESTÁTICAS	14
3.1 Introducción	14
3.2 Desarrollo de las simulaciones.....	15
3.3 Escalones.....	15
3.3.1 <i>Escalón $h=r/3$</i>	16
3.3.2 <i>Otros escalones</i>	19
3.3.3 <i>Análisis de los resultados</i>	19
3.4 Rampas	20
3.4.1 <i>Rampa $\alpha=30^\circ$</i>	21
3.4.2 <i>Otras rampas</i>	23
3.4.3 <i>Análisis de los resultados</i>	24
4. SIMULACIONES DINÁMICAS	27
4.1 Introducción	27
4.2 Tiempo de paso de un escalón $h=2r/3$	28

ÍNDICE general

4.2.1 <i>Análisis de los resultados</i>	33
4.3 <i>Influencia de la tracción y el coeficiente de rozamiento</i>	35
4.3.1 <i>Coeficiente de rozamiento $\mu=0.7$</i>	36
4.3.2 <i>Otros coeficientes de rozamiento</i>	39
4.3.3 <i>Análisis de los resultados</i>	39
5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	44
5.1 <i>Conclusiones</i>	44
5.2 <i>Trabajos futuros</i>	45
6. PRESUPUESTO	47
6.1 <i>Introducción</i>	47
6.2 <i>Desarrollo del proyecto</i>	47
6.2.1 <i>Fase de Análisis</i>	47
6.2.2 <i>Fase de diseño</i>	48
6.2.3 <i>Fase de desarrollo</i>	48
6.2.4 <i>Fase de documentación</i>	48
6.3 <i>Costes</i>	49
6.3.1 <i>Costes de personal</i>	49
6.3.2 <i>Costes de material y herramientas</i>	49
7. REFERENCIAS	51
8. ANEXO	53

Índice de figuras

<i>Figura 1. UGV modelo LandShark de Black-i Robotics [2]</i>	1
<i>Figura 2. Modelo real creado por Tallinn University of Technology</i>	8
<i>Figura 3. Dimensiones de los elementos que componen el UGV</i>	9
<i>Figura 4. Definición de los ángulos ϕ_d y ϕ_t</i>	9
<i>Figura 5. Estructura del UGV en Working Model</i>	10
<i>Figura 6. Unión entre cuerpo y patas en Working Model</i>	11
<i>Figura 7. Unión entre patas y ruedas en Working Model</i>	11
<i>Figura 8. Superficie a recorrer en Working Model</i>	12
<i>Figura 9. Representación de escalón y rampa para estudio cuasiestático en Working Model</i>	14
<i>Figura 10. Definición de la altura del escalón</i>	16
<i>Figura 11. Ejemplo de configuración definida como imposible</i>	16
<i>Figura 12. Configuración de mínimo par para un escalón $h=r/3$</i>	18
<i>Figura 13. Estudio de la configuración en la que el par es mínimo en función de la altura del escalón</i>	19
<i>Figura 14. Evolución del par mínimo (N·m) necesario para superar un escalón en función de su altura</i>	20
<i>Figura 15. Definición de la inclinación de la pendiente</i>	21
<i>Figura 16. Configuración de mínimo par para una rampa $\alpha=30^\circ$</i>	23
<i>Figura 17. Estudio de la configuración en la que el par es mínimo en función de la inclinación de la rampa</i>	24
<i>Figura 18. Evolución del par mínimo (N·m) necesario para superar una rampa en función de su inclinación</i>	25
<i>Figura 19. Definición de la distancia inicial al obstáculo para las simulaciones dinámicas</i>	27
<i>Figura 20. Definición del tiempo de paso de una rueda sobre el obstáculo</i>	28
<i>Figura 21. Estudio de la configuración en la que el tiempo de paso es mínimo en función del par M aplicado</i>	33

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 22. Configuración óptima para superar un escalón $h=2r/3$ cuando el par aplicado M es pequeño.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 23. Configuración óptima para superar un escalón $h=2r/3$ en el menor tiempo posible</i>	<i>34</i>
<i>Figura 24. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas del UGV sobre un escalón de altura $h=2r/3$ en función del par M aplicado</i>	<i>35</i>
<i>Figura 25. Estudio de la configuración en la que el tiempo de paso es mínimo en función del par M aplicado con tracción delantera.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 26. Estudio de la configuración en la que el tiempo de paso es mínimo en función del par M aplicado con tracción trasera</i>	<i>40</i>
<i>Figura 27. Configuración óptima para superar un escalón $h=2r/3$ con tracción delantera</i>	<i>40</i>
<i>Figura 28. Configuración óptima para superar un escalón $h=2r/3$ con tracción trasera.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 29. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas del UGV sobre un escalón de altura $h=2r/3$ en función del coeficiente de rozamiento (config. 135°-45°)</i>	<i>41</i>
<i>Figura 30. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas del UGV sobre un escalón de altura $h=2r/3$ en función del coeficiente de rozamiento (config. 180°-90°)</i>	<i>42</i>
<i>Figura 31. Diagrama de Gantt</i>	<i>48</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Simulación cuasiestática $h=r/3$ inicial</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 2. Simulación cuasiestática $h=r/3$ detallada</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 3. Simulación cuasiestática $h=r/3$ primera iteración</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 4. Simulación cuasiestática $h=r/3$ segunda iteración</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 5. Simulación cuasiestática $h=r/3$ tercera iteración</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 6. Simulación cuasiestática $\alpha=30^\circ$ inicial</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 7. Simulación cuasiestática $\alpha=30^\circ$ detallada</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 8. Simulación cuasiestática $\alpha=30^\circ$ primera iteración</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 9. Simulación cuasiestática $\alpha=30^\circ$ segunda iteración</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 10. Simulación cuasiestática $\alpha=30^\circ$ tercera iteración</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 11. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=50\text{ N}\cdot\text{m}$</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 12. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=75\text{ N}\cdot\text{m}$</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 13. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=100\text{ N}\cdot\text{m}$</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 14. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=125\text{ N}\cdot\text{m}$</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 15. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=150\text{ N}\cdot\text{m}$</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 16. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=175\text{ N}\cdot\text{m}$</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 17. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=200\text{ N}\cdot\text{m}$</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 18. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=100\text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=0.7$</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 19. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=150\text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=0.7$</i>	<i>36</i>

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 20. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=200\text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=0.7$	37
Tabla 21. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=250\text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=0.7$	37
Tabla 22. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=100\text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=0.7$	37
Tabla 23. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=150\text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=0.7$	38
Tabla 24. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=200\text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=0.7$	38
Tabla 25. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=250\text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=0.7$	38
Tabla 26. Simulación cuasiestática $h=r/2$ inicial	54
Tabla 27. Simulación cuasiestática $h=r/2$ detallada	54
Tabla 28. Simulación cuasiestática $h=r/2$ primera iteración	54
Tabla 29. Simulación cuasiestática $h=r/2$ segunda iteración	55
Tabla 30. Simulación cuasiestática $h=r/2$ tercera iteración	55
Tabla 31. Simulación cuasiestática $h=2r/3$ inicial	56
Tabla 32. Simulación cuasiestática $h=2r/3$ detallada	56
Tabla 33. Simulación cuasiestática $h=2r/3$ primera iteración	56
Tabla 34. Simulación cuasiestática $h=2r/3$ segunda iteración	57
Tabla 35. Simulación cuasiestática $h=2r/3$ tercera iteración	57
Tabla 36. Simulación cuasiestática $h=5r/6$ inicial	58
Tabla 37. Simulación cuasiestática $h=5r/6$ detallada	58
Tabla 38. Simulación cuasiestática $h=5r/6$ primera iteración	58
Tabla 39. Simulación cuasiestática $h=5r/6$ segunda iteración	59
Tabla 40. Simulación cuasiestática $h=5r/6$ tercera iteración	59
Tabla 41. Simulación cuasiestática $h=r$ inicial	60
Tabla 42. Simulación cuasiestática $h=r$ detallada	60
Tabla 43. Simulación cuasiestática $h=r$ primera iteración	60
Tabla 44. Simulación cuasiestática $h=r$ segunda iteración	61
Tabla 45. Simulación cuasiestática $h=r$ tercera iteración	61
Tabla 46. Simulación cuasiestática $\alpha=50^\circ$ inicial	62
Tabla 47. Simulación cuasiestática $\alpha=50^\circ$ detallada	62
Tabla 48. Simulación cuasiestática $\alpha=50^\circ$ primera iteración	62
Tabla 49. Simulación cuasiestática $\alpha=50^\circ$ segunda iteración	63
Tabla 50. Simulación cuasiestática $\alpha=50^\circ$ tercera iteración	63
Tabla 51. Simulación cuasiestática $\alpha=70^\circ$ inicial	64
Tabla 52. Simulación cuasiestática $\alpha=70^\circ$ detallada	64
Tabla 53. Simulación cuasiestática $\alpha=70^\circ$ primera iteración	64
Tabla 54. Simulación cuasiestática $\alpha=70^\circ$ segunda iteración	65
Tabla 55. Simulación cuasiestática $\alpha=70^\circ$ tercera iteración	65
Tabla 56. Simulación cuasiestática $\alpha=90^\circ$ inicial	66
Tabla 57. Simulación cuasiestática $\alpha=90^\circ$ detallada	66
Tabla 58. Simulación cuasiestática $\alpha=90^\circ$ primera iteración	66
Tabla 59. Simulación cuasiestática $\alpha=90^\circ$ segunda iteración	67
Tabla 60. Simulación cuasiestática $\alpha=90^\circ$ tercera iteración	67
Tabla 61. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=100\text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=1$	68

Tabla 62. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=150 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=1$	68
Tabla 63. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=200 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=1$	68
Tabla 64. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=250 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=1$	69
Tabla 65. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=100 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=1$	70
Tabla 66. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=150 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=1$	70
Tabla 67. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=200 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=1$	70
Tabla 68. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=250 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=1$	71
Tabla 69. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=100 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=10$	72
Tabla 70. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=150 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=10$	72
Tabla 71. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=200 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=10$	72
Tabla 72. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=250 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=10$	73
Tabla 73. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=100 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=10$	74
Tabla 74. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=150 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=10$	74
Tabla 75. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=200 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=10$	74
Tabla 76. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=250 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=10$	75
Tabla 77. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=100 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=1.000$	76
Tabla 78. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=150 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=1.000$	76
Tabla 79. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=200 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=1.000$	76
Tabla 80. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=250 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=1.000$	77
Tabla 81. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=100 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=1.000$	78
Tabla 82. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=150 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=1.000$	78
Tabla 83. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=200 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=1.000$	78
Tabla 84. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=250 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=1.000$	79
Tabla 85. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=100 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=100.000$	80
Tabla 86. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=150 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=100.000$	80

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 87. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par</i> <i>M=200 N·m con tracción delantera y $\mu=100.000$</i>	80
<i>Tabla 88. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par</i> <i>M=250 N·m con tracción delantera y $\mu=100.000$</i>	81
<i>Tabla 89. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par</i> <i>M=100 N·m con tracción trasera y $\mu=100.000$</i>	82
<i>Tabla 90. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par</i> <i>M=150 N·m con tracción trasera y $\mu=100.000$</i>	82
<i>Tabla 91. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par</i> <i>M=200 N·m con tracción trasera y $\mu=100.000$</i>	82
<i>Tabla 92. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par</i> <i>M=250 N·m con tracción trasera y $\mu=100.000$</i>	83

Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1 Introducción

Un UGV (del inglés Unmanned Ground Vehicle), Vehículo Terrestre No Tripulado en castellano, es aquel que, sin presencia de un piloto humano a bordo, puede desplazarse sobre una superficie. Por lo general, estos vehículos son capaces de analizar el entorno en el que deben moverse, tomar decisiones acerca de la mejor manera de afrontar el terreno y enviar información necesaria para su control. [1]



Figura 1. UGV modelo LandShark de Black-i Robotics [2]

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN y objetivos

Estos vehículos pueden tener múltiples utilidades, tanto civiles como militares. Su principal ventaja es la de poder operar en zonas que podrían resultar peligrosas o incluso inaccesibles para los humanos. De este modo pueden desarrollar las tareas más arduas y arriesgadas, reduciendo los daños y abriendo nuevos frentes de trabajo.

Sus principales usos son los siguientes:

- Militar: En este ámbito es en el que mayores desarrollos se están efectuando. Los UGVs se utilizan principalmente para explorar zonas no seguras o desconocidas, transporte de material y desactivación de explosivos.
- Ayuda humanitaria: Facilitan la llegada a zonas devastadas o de difícil acceso para el hombre con el fin de transportar alimentos y medicinas e incluso atender a las víctimas de catástrofes.
- Seguridad: Equipados con cámaras de videovigilancia pueden recorrer grandes distancias fácilmente y captar todos los ángulos requeridos. También se están desarrollando vehículos no tripulados destinados a la extinción de incendios.
- Industria: Sus principales utilidades en este campo son el manejo de herramientas, inspección de equipo y transporte de materiales.[3]

Los sistemas no tripulados han supuesto grandes cambios en los últimos años y se están promoviendo múltiples desarrollos en torno a estas tecnologías. Es por ello que este proyecto se centrará en el estudio del movimiento de un vehículo terrestre no tripulado en diferentes situaciones a través de un software de simulación.

Para poder profundizar y optimizar el estudio, este se basará en un modelo concreto de UGV diseñado y desarrollado por la *Tallinn University of Technology*. Uno de los principales problemas de este vehículo es su limitada autonomía, por lo que se analizará su movimiento buscando las claves para lograr reducir su consumo y conseguir un mayor tiempo de trabajo.

Este UGV tiene la capacidad de analizar el terreno por el que se desplaza y se caracteriza por mantener las ruedas unidas al cuerpo mediante unas patas que tienen la particularidad de poder definir el ángulo que forman respecto al cuerpo. Esto permite que pueda configurar su posición en función de las necesidades requeridas en cada momento. Es por ello que a lo largo de este proyecto analizaremos diferentes obstáculos que puedan presentarse en la superficie a recorrer y la forma en la que el vehículo los afronta en función de la configuración adoptada.

1.2 Objetivos

El objetivo fundamental del proyecto es el de estudiar el paso por diferentes obstáculos de un vehículo terrestre no tripulado en distintas configuraciones, obteniendo una optimización de su rendimiento. En base a ese objetivo principal, se proponen los siguientes objetivos parciales:

- Encontrar la configuración óptima de los elementos que componen el vehículo en la que el motor genere el mínimo par necesario para superar algún obstáculo en el terreno (escalón, rampa,...).
- Estudiar la influencia del tipo de tracción aplicada al vehículo. Se realizarán simulaciones de tracción delantera, trasera y total.
- Estudiar la influencia del coeficiente de rozamiento existente entre las ruedas y la superficie a recorrer.
- Ofrecer una configuración aplicable a diferentes superficies a recorrer que el vehículo pueda adoptar con facilidad mejorando su rendimiento.

1.3 Fases del proyecto

El desarrollo del proyecto ha constado de las siguientes fases:

- Fase de Análisis
 - Análisis de la situación.
 - Planteamiento de los casos de estudio.
 - Definición del desarrollo del proyecto.
- Fase de Diseño
 - Análisis del modelo real.
 - Diseño del UGV en Working Model.
- Fase de Desarrollo
 - Simulaciones cuasiestáticas para escalones de varias alturas.
 - Simulaciones cuasiestáticas para rampas de diferentes inclinaciones.
 - Simulaciones dinámicas del movimiento del vehículo para diversas configuraciones de posición del vehículo.
 - Simulaciones dinámicas del movimiento del vehículo variando la tracción del vehículo y el coeficiente de rozamiento.
 - Análisis de los resultados
- Fase de Documentación
 - Recopilación de datos y resultados.
 - Creación de la memoria.

1.4 Medios empleados

A continuación se presenta una breve descripción de las herramientas utilizadas en el desarrollo del proyecto, así como el uso concreto que se les ha dado en el mismo.

1.4.1 Working Model 2D

Working Model 2D Dynamic Motion Simulation es un software desarrollado por la empresa dts Desing Simulation Technology. Está englobado dentro de la categoría de herramientas CAE (Ingeniería Asistida por Ordenador) y permite recrear simulaciones de sistemas mecánicos reales, reduciendo el tiempo de diseño, mejorando la calidad final del producto y optimizando los cálculos.

Se ha empleado esta herramienta para llevar a cabo el diseño simplificado del UGV a partir de las dimensiones reales del modelo sujeto a estudio así como de los diferentes terrenos a afrontar. Una vez finalizado el entorno se han realizado múltiples simulaciones con diferentes configuraciones.

1.4.2 Microsoft Excel

Microsoft Excel es una aplicación distribuida por Microsoft Office. Es una herramienta ofimática perteneciente al conjunto de programas denominados Hoja de Cálculo, en la cual se puede escribir, almacenar, manipular, calcular y organizar todo tipo de información alfanumérica. La principal ventaja del uso de este tipo de aplicaciones se encuentra en la capacidad para interconectar unas celdas con otras mediante el uso de funciones o reglas.

A lo largo de este proyecto, se ha utilizado esta herramienta para almacenar todos los datos obtenidos de las simulaciones en forma de tablas. Además, se ha hecho uso de la misma para generar gráficas a partir de dichos datos que facilitasen su análisis y comprensión.

1.4.3 Microsoft Word

Microsoft Word es la aplicación del paquete Office de Microsoft orientada a la edición y procesamiento de textos.

Esta herramienta ha sido utilizada para generar esta memoria.

1.5 Estructura de la memoria

Este documento se ha dividido en diferentes capítulos. Para facilitar la lectura de la memoria, se incluye a continuación un breve resumen de cada uno de ellos.

Capítulo 1. Introducción y objetivos. En él se hace una introducción a la memoria, se detallan los objetivos del proyecto y se explican las fases de desarrollo. Además se explican las herramientas utilizadas y se resume la estructura de la memoria.

Capítulo 2. Presentación del UGV. En este capítulo se hablará del estado del arte, analizando el vehículo real en el que está basado este proyecto y su representación en el software de simulación empleado.

Capítulo 3. Simulaciones cuasiestáticas. Se detallan los distintos casos de simulaciones cuasiestáticas realizadas, así como la metodología del desarrollo de las mismas. Finalmente se analizan los resultados obtenidos.

Capítulo 4. Simulaciones dinámicas. En esta sección se exponen las simulaciones dinámicas ejecutadas, el desarrollo de cada una de ellas y se muestran los resultados obtenidos.

Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros. Se detallan las conclusiones obtenidas tras la realización de las simulaciones, así como las posibles líneas de trabajo futuras.

Capítulo 6. Presupuesto. Se analizan las fases del proyecto y el tiempo empleado en cada una de ellas mostrando su correspondiente diagrama de Gantt. Se calculan los costes totales del proyecto.

Anexo. En esta sección se recogen las tablas de datos obtenidas de las simulaciones.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN y objetivos

Capítulo 2

Presentación del UGV

2.1 Estado del arte

En la actualidad, el desarrollo de vehículos no tripulados es una de las principales líneas de trabajo e investigación en robótica. Pueden utilizarse en ámbitos muy diversos y presentan numerosas ventajas frente a los vehículos con conductor en entornos inseguros o de difícil acceso.

Desde 2011 la *Tallinn University of Technology* ha estado trabajando en el diseño y desarrollo de un UGV. [4] Se trata de un vehículo todo terreno de tracción a las cuatro ruedas. Destaca por la particularidad de que cada una de las ruedas está unida al cuerpo mediante una barra articulada, de manera que los ángulos entre el cuerpo y dichas barras pueden modificarse. Esta característica ofrece una gran variedad de configuraciones de posición, las cuales permiten que la posición del centro de masas del vehículo y la distancia entre el cuerpo y la superficie de rodadura puedan ser modificadas durante toda la marcha. [5] [6]



Figura 2. Modelo real creado por Tallinn University of Technology

En 2013, Jesús Meneses Alonso y Eduardo Corral Abad, profesores del departamento de Ingeniería Mecánica y miembros de grupo de investigación MAQLAB: Laboratorio de Máquinas de la Universidad Carlos III de Madrid, se interesaron por el UGV creado en Tallin (*ver Figura 2*) y desarrollaron una línea de investigación en la cual realizaron diversos estudios sobre este UGV. Los resultados obtenidos fueron presentados en la conferencia internacional Mechatronic Systems and Materials (MSM 2013) que tuvo lugar en Vilnius ese mismo año. [7]

El presente proyecto parte de los estudios realizados en 2013 por los citados profesores. Dichos estudios siguieron un procedimiento analítico basado en el cálculo teórico cuasiestático de un modelo de vehículo $\frac{1}{2}$ y contaron con el soporte de la herramienta Matlab. Los casos recogidos en este proyecto amplían dichos estudios y los complementan, utilizando en este caso un software comercial de simulación.

2.2 Dimensiones del UGV

A continuación se analizarán las dimensiones y características particulares del vehículo no tripulado en el que se han basado las simulaciones.

Este UGV se compone de los siguientes elementos: un cuerpo, cuatro patas y cuatro ruedas. De manera simplificada, el cuerpo y las patas se representarán mediante rectángulos y las ruedas con circunferencias.

Las dimensiones y masas de estos elementos son las siguientes:

$H_c = 0.15 \text{ m}$
 $L_c = 0.832 \text{ m}$
 $M_c = 200 \text{ kg}$

$H_p = 0.02 \text{ m}$
 $L_p = 0.35 \text{ m}$
 $M_p = 20 \text{ kg}$

$$R_r = 0.15 \text{ m}$$

$$M_r = 50 \text{ kg}$$

En la Figura 3 se muestran las diferentes partes de las que consta el vehículo empleado en las simulaciones:

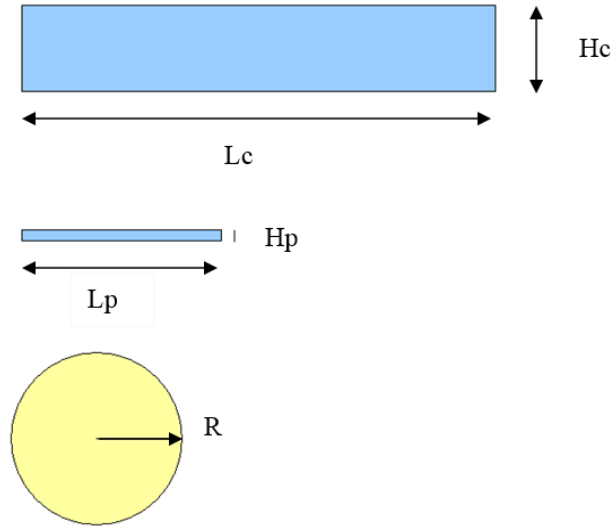


Figura 3. Dimensiones de los elementos que componen el UGV

La principal característica de este modelo es su capacidad para variar el ángulo que forman las patas respecto al cuerpo. De esta manera puede adoptar múltiples configuraciones a partir de dos ángulos definidos como φ_d y φ_t (ver Figura 4). Estos ángulos pueden variar entre 0° y 180° . En este estudio se considerará 0° cuando la pata esté completamente pegada al cuerpo y 180° cuando esté totalmente abierta.

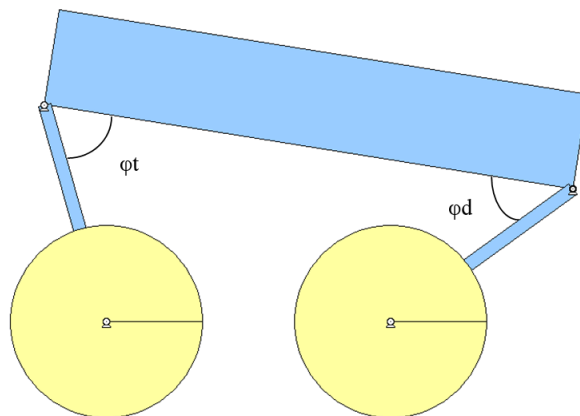


Figura 4. Definición de los ángulos φ_d y φ_t

2.3 Representación en Working Model

Working Model 2D es la herramienta CAE en la que se realizarán las simulaciones. Para ello es necesario representar todos los elementos que componen la estructura del vehículo, la unión de estos elementos entre sí y las distintas superficies por la que va a desplazarse.

2.3.1 Estructura del UGV

Working Model es un programa de simulación en dos dimensiones, por lo que se representarán únicamente el perfil del UGV. El modelo a simular es un vehículo $\frac{1}{2}$, por tanto, plano.

Se comienza dibujando el perfil del cuerpo, los dos rectángulos que representan las patas y dos ruedas.

Una vez dibujadas las piezas con las dimensiones correctas seleccionamos uno a uno cada elemento y en la ventana de propiedades se definen las características de cada uno: masa, coeficiente de rozamiento, coeficiente de restitución,...

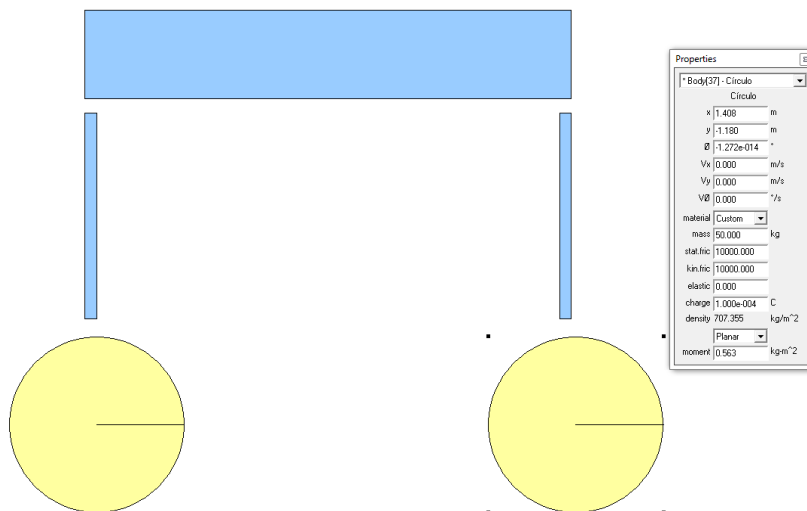


Figura 5. Estructura del UGV en Working Model

En la Figura 5 se puede apreciar la ventana de propiedades correspondiente a la rueda seleccionada, en la que se introducen los valores propios de cada elemento.

2.3.2 Unión de elementos

La unión entre el cuerpo y las patas se lleva a cabo mediante dos motores de rotación situados en las esquinas inferiores del recuadro que representa el cuerpo. Este punto se debe hacer coincidir con el centro de la parte superior de cada pata.

Estos motores de rotación nos permiten establecer un ángulo de giro y por tanto nos permitirán definir los ángulos ϕ_d y ϕ_t en cada una de las simulaciones, como se muestra en la siguiente figura.

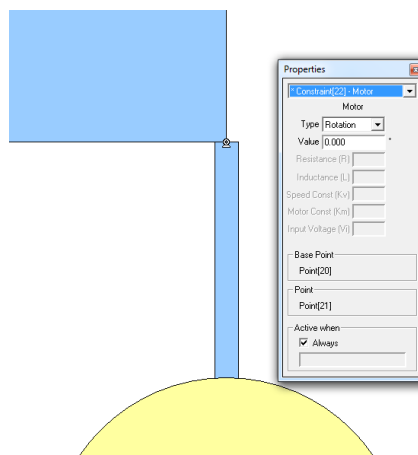


Figura 6. Unión entre cuerpo y patas en Working Model

La unión entre las patas y las ruedas se lleva a cabo mediante dos motores de par. Se hace coincidir el centro de la parte inferior de cada una de las patas con el centro de la rueda a la que se quiere unir. El motor se colocará en ese mismo punto.

Como se puede apreciar en la Figura 7, los motores de par nos permiten aplicar un par medido en N·m a cada una de las ruedas. En los estudios realizados con tracción a las cuatro ruedas configuraremos ambos motores con el mismo valor de par. En los estudios de tracción delantera o trasera aplicaremos el par en el motor que corresponda y el otro se dejará con un valor 0.

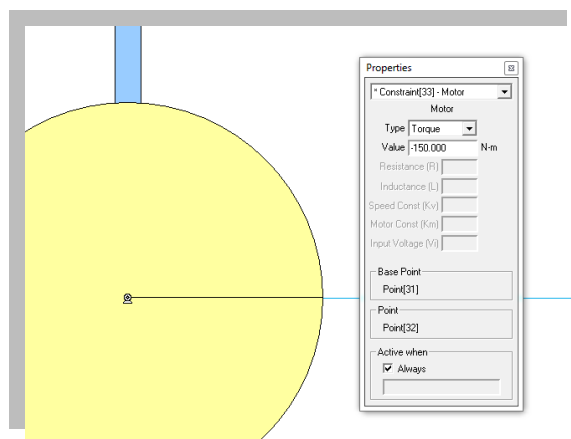


Figura 7. Unión entre patas y ruedas en Working Model

2.3.3 Superficie

La superficie a recorrer se representará con las geometrías necesarias en cada uno de los casos llevados a estudio. En los estudios recogidos en este proyecto, todas las superficies pueden representarse mediante rectángulos o polígonos a los que se proporciona una longitud y una inclinación requeridas.

Una vez definidas las superficies es necesario poner un ancla sobre ellas para mantenerla fijas, ya que Working Model simula la fuerza de la gravedad y en caso contrario, al iniciar la simulación caerían.

Una vez dibujada la superficie se establecen para ella los valores del coeficiente de rozamiento y coeficiente de restitución con los que queremos trabajar. En la Figura 8 se muestra la correspondiente ventana de propiedades en la que se definen dichos valores.

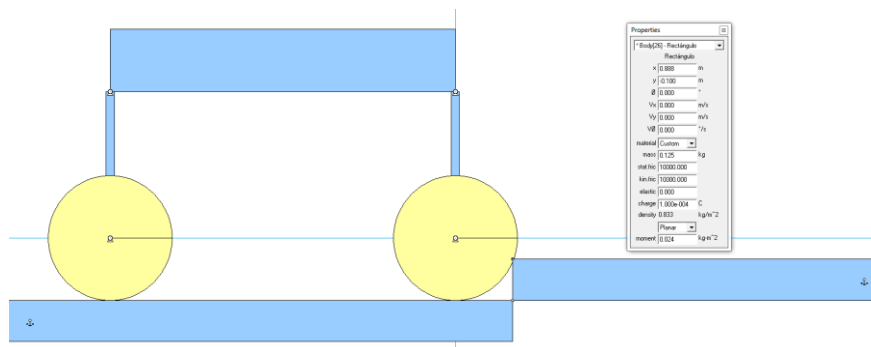


Figura 8. Superficie a recorrer en Working Model

Capítulo 3

Simulaciones cuasiestáticas

3.1 Introducción

El primer estudio se ha realizado en condiciones cuasiestáticas. El objetivo principal es encontrar la configuración que debe adoptar el vehículo para afrontar un obstáculo en el terreno de manera que el par para superarlo sea mínimo necesario.

Los obstáculos a afrontar se han dividido en dos tipos: escalones y rampas.

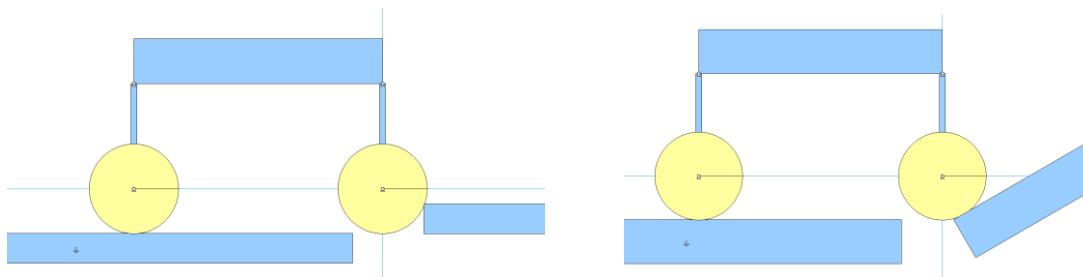


Figura 9. Representación de escalón y rampa para estudio cuasiestático en Working Model

Para las simulaciones cuasiestáticas se han seguido las siguientes premisas:

- El par aplicado a la rueda delantera y a la trasera será el mismo (condición de tracción total).
- Se define un coeficiente de rozamiento estático y dinámico exageradamente elevado (en las simulaciones $\mu=10000$). Con ello se pretende asegurar que el vehículo rueda sin deslizar.
- El coeficiente de restitución será 0.
- Se elimina el apoyo de la rueda delantera sobre la superficie inicial y se hace coincidir el punto de la rueda que primero alcanza el obstáculo con el mismo. Con esto se representa el punto exacto en el que la rueda delantera se despega del suelo e inicia el movimiento, desapareciendo la fuerza normal ejercida por el suelo.

3.2 Desarrollo de las simulaciones

Se estudiarán diversas configuraciones posibles del vehículo, teniendo en cuenta que los ángulos ϕ_d y ϕ_t pueden variar entre 0° y 180° . Para cada una de las configuraciones estudiadas se ha aplicado un par M que será igual en la rueda delantera y en la trasera.

A continuación se ejecuta la simulación y se analiza si el vehículo es capaz de comenzar a subir el obstáculo o no. Al ser un estudio cuasiestático solo nos centraremos en la capacidad para iniciar el movimiento en el instante inicial, sin tener en cuenta si en dicha configuración podría continuar el movimiento en los siguientes instantes.

Si es capaz de subir el obstáculo iremos disminuyendo el par aplicado a los motores de las ruedas delantera y trasera. Si, por el contrario, la rueda delantera no es capaz de ascender por el obstáculo y cae, tendremos que aumentarlo. Finalmente se anota en una tabla en valor mínimo del par necesario para que el UGV comience el movimiento de paso por el obstáculo.

3.3 Escalones

Como primer estudio se ha simulado la subida de un escalón de diferentes alturas para analizar cómo influye dicha altura en el par que necesitaremos aplicar al UGV.

Se harán cinco grupos de simulaciones diferentes, en las que la altura 'h' del escalón será cierta fracción del radio de la rueda:

$$h=r/3$$

$$h=r/2$$

$$h=2r/3$$

$$h=5r/6$$

$$h=r$$

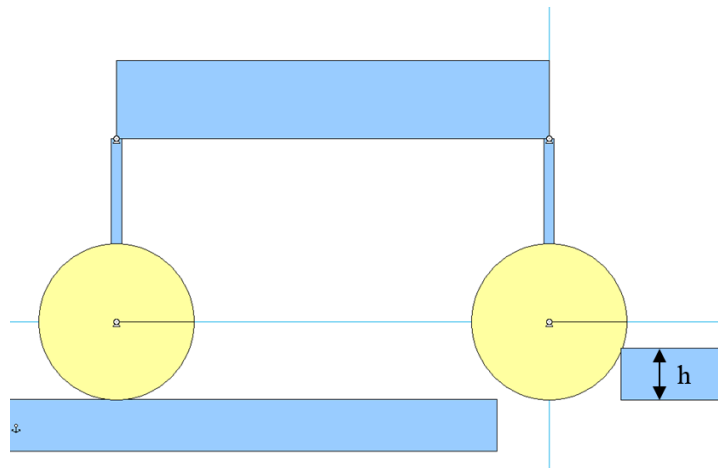


Figura 10. Definición de la altura del escalón

3.3.1 Escalón $h=r/3$

Comenzaremos aplicando unos ángulos ϕ_d y ϕ_t de 0° , 45° , 90° , 135° y 180° . Conseguimos una tabla muy simplificada que servirá para tener una idea general del orden de magnitud del par M con el que vamos a trabajar.

En las tablas de resultados, las posiciones en las que aparece “Imp” hacen referencia a una configuración del vehículo en la que es físicamente imposible el movimiento ya que alguna parte del vehículo se superpone con la superficie a recorrer (ver Figura 11).

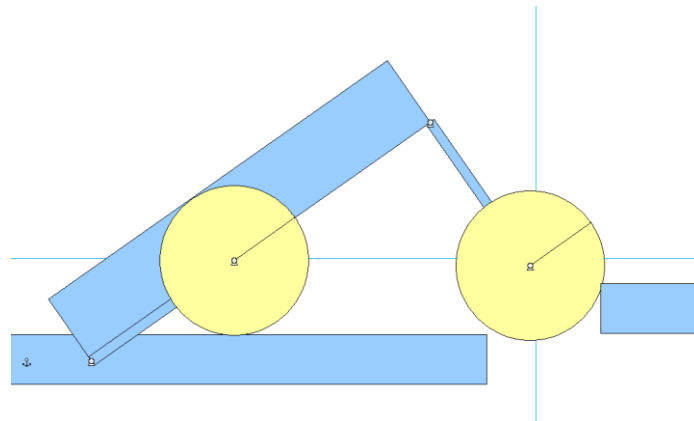


Figura 11. Ejemplo de configuración definida como imposible

En la Tabla 1 se muestran los resultados de esas primeras simulaciones.

h=r/3					
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0	45	90	135	180
0	55	Imp	Imp	40	44
45	Imp	79	54	59	66
90	Imp	126	96	88	89
135	Imp	132	109	100	100
180	147	128	110	103	102

Tabla 1. Simulación cuasiestática h=r/3 inicial

A continuación se repite la simulación con variaciones de 22.5° para ambos ángulos. Para cada posición de φ_t se ha resaltado el menor valor del par encontrado. De esta manera se puede ver gráficamente la evolución del par en función de la configuración aplicada a las patas.

h=r/3									
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0	22,5	45	67,5	90	112,5	135	157,5	180
0	55	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	40	42	44
22,5	Imp	63	28	28	33	39	43	48	52
45	Imp	119	79	58	54	56	59	63	66
67,5	Imp	136	113	90	79	76	76	78	80
90	Imp	140	126	107	96	90	88	88	89
112,5	Imp	141	131	115	105	99	96	95	96
135	Imp	140	132	118	109	103	100	99	100
157,5	148	138	130	119	110	105	103	101	101
180	147	135	128	117	110	105	103	102	102

Tabla 2. Simulación cuasiestática h=r/3 detallada

En un color más intenso destacamos el mínimo par conseguido con esta simulación. El siguiente paso será definir unos ángulos más precisos entorno al valor mínimo hallado.

h=r/3						
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	40	45	50	55	60	65
20	26	24	23	23	24	25
22,5	31	27	26	25	26	26
25	37	32	29	28	28	29

Tabla 3. Simulación cuasiestática h=r/3 primera iteración

Continuamos aumentando la precisión. Nos centramos en la zona de la Tabla 3 en la que hemos encontrado el menor par, disminuimos el intervalo de posición de ambas patas a 1° y precisamos el valor del par añadiendo un decimal.

$h=r/3$							
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	47	48	49	50	51	52	53
14	19,1	19,2	19,3	19,6	19,6	19,8	20
15	19,4	19,5	19,6	19,7	19,8	19,9	20,1
16	19,9	19,9	20	20	20,1	20,2	20,4
17	20,5	20,5	20,5	20,5	20,6	20,7	20,8
18	21,2	21,2	21,1	21,1	21,1	21,2	21,3
19	22,1	22	21,9	21,9	21,8	21,9	21,9

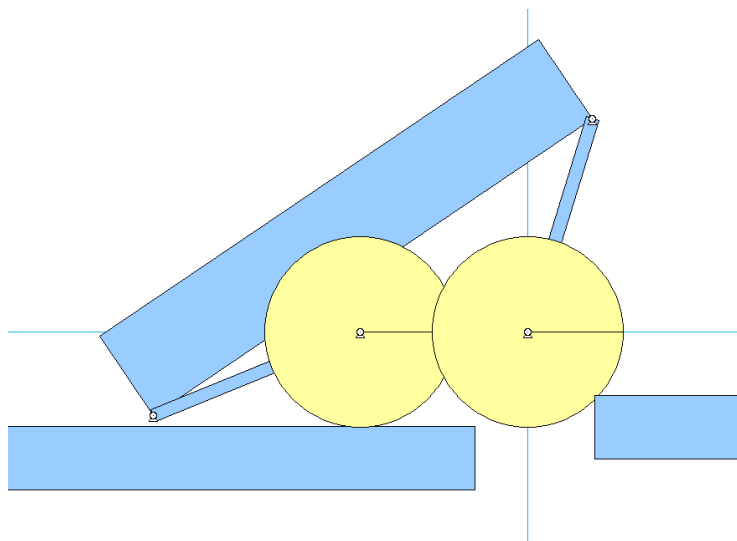
Tabla 4. Simulación cuasiestática $h=r/3$ segunda iteración

En la Tabla 4 se puede apreciar que en esta zona existe una tendencia en la que el par disminuye conforme se reducen los ángulos delantero y trasero. Se continúa simulando en esa dirección.

$h=r/3$									
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	38	39	40	41	42	43	44	45	46
11	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp
12	18,7	18,5	18,5	18,5	18,7	18,8	Imp	Imp	Imp
13	19,1	18,9	18,8	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7	18,8
14	19,7	19,4	19,2	19,1	19	19	19	19	19

Tabla 5. Simulación cuasiestática $h=r/3$ tercera iteración

Se llega a un punto en el que es físicamente imposible reducir el ángulo trasero φ_t ya que el cuerpo del UGV apoya en el suelo. Si disminuye el ángulo delantero más allá de este punto el par aumenta, por lo que llegamos a tres configuraciones en las que el par es mínimo. Entre estas se ha seleccionado como configuración óptima $\varphi_d = 39^\circ$ y $\varphi_t = 12^\circ$ ya que es con la que se consigue mayor distancia del cuerpo al suelo para evitar la colisión. En la Figura 12 se muestra el UGV en dicha configuración.

Figura 12. Configuración de mínimo par para un escalón $h=r/3$

3.3.2 Otros escalones

Este mismo proceso se ha repetido para cuatro alturas más del escalón: $h=r/2$, $h=2r/3$, $h=5r/3$ y $h=r$. Con el fin de evitar una memoria demasiado extensa, estas tablas se recogen en el anexo que se encuentra al final de este documento.

En el estudio cuasiestático del paso de un escalón de diferentes alturas se han realizado 177 simulaciones para cada uno de los casos. Teniendo en cuenta que se han representado cinco escalones diferentes, el total de simulaciones realizadas es de 885.

3.3.3 Análisis de los resultados

A la luz de los resultados obtenidos en el estudio cuasiestático del paso de un escalón, podemos concluir que la configuración del UGV para la cual el par aplicado es mínimo no varía en función de la altura de dicho escalón.

Para los diferentes escalones analizados encontramos que la posición del UGV para la que el par se reduce al mínimo posible es aquella en la que el ángulo trasero ϕ_t es igual a 12° y el delantero ϕ_d se encuentra entorno a 40° .

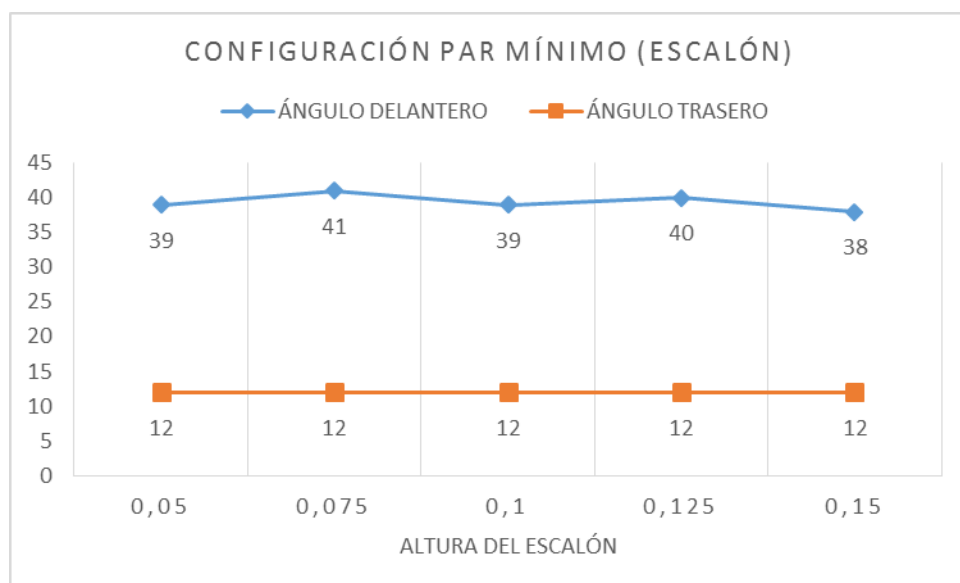


Figura 13. Estudio de la configuración en la que el par es mínimo en función de la altura del escalón

Como conclusión final arrojada por los datos de estas simulaciones podemos destacar que el par necesario para superar un escalón se reduce cuanto menor es la altura de este, como podemos ver en el siguiente gráfico:

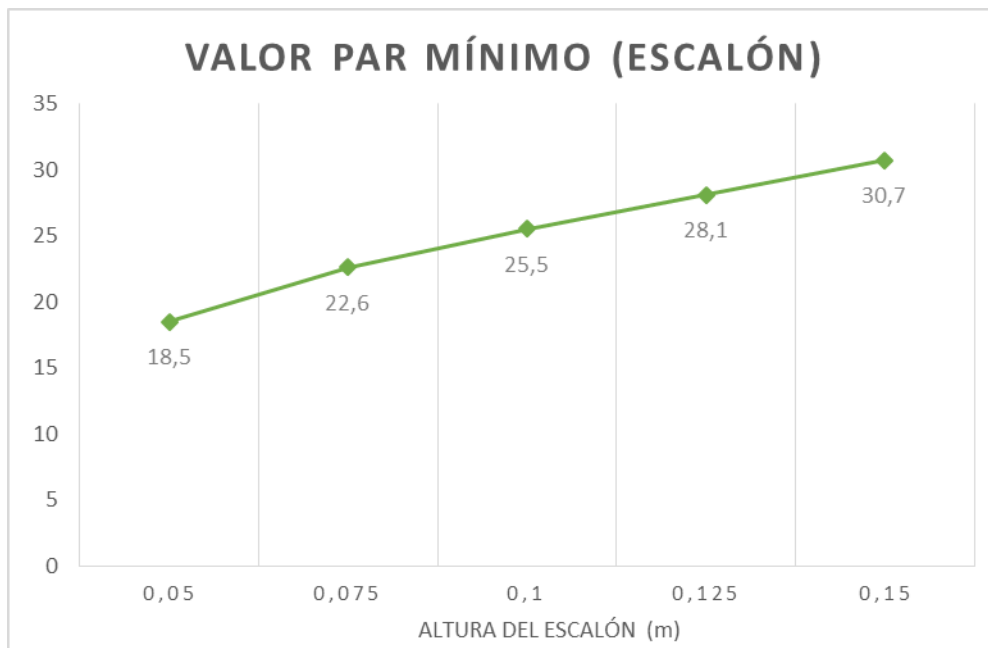


Figura 14. Evolución del par mínimo (N·m) necesario para superar un escalón en función de su altura

3.4 Rampas

En este segundo estudio se ha simulado el ascenso del UGV al comienzo de una rampa de distintas inclinaciones con el objetivo de analizar cómo influye dicha inclinación en el par que necesitaremos aplicar a las ruedas del vehículo para que sea capaz de ascender por ella.

La pendiente de la rampa queda definida mediante un ángulo α . Dicho ángulo será el formado entre la rampa y la superficie horizontal desde la que el vehículo inicia el movimiento. En la Figura 15 se muestra el vehículo al inicio de un obstáculo de tipo rampa definida por un ángulo α .

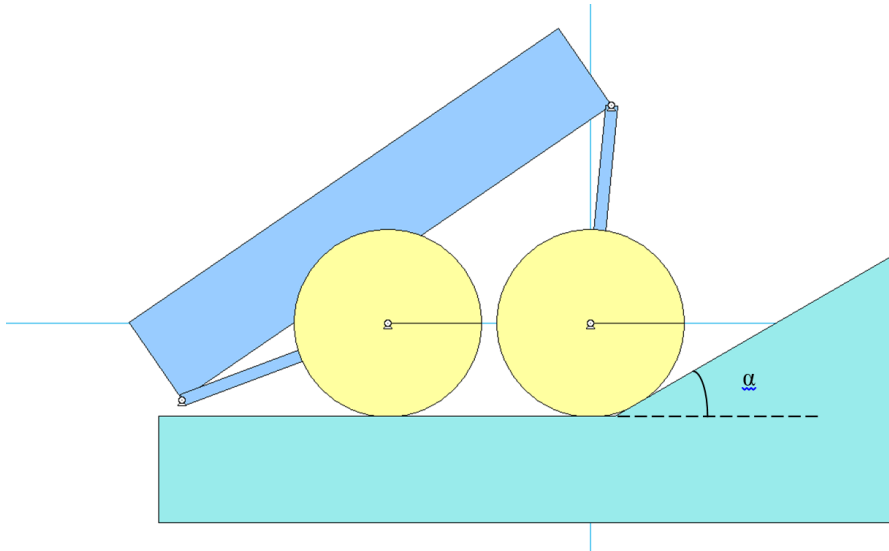


Figura 15. Definición de la inclinación de la pendiente

Se han realizado simulaciones para cuatro ángulos diferentes:

$$\alpha = 30^\circ$$

$$\alpha = 50^\circ$$

$$\alpha = 70^\circ$$

$$\alpha = 90^\circ$$

3.4.1 Rampa $\alpha=30^\circ$

Al igual que en el caso del escalón, se comienza simulando el movimiento en todas las combinaciones posibles resultantes de aplicar unos ángulos φ_d y φ_t de 0° , 45° , 90° , 135° y 180° . Conseguimos una tabla muy simplificada (Tabla 6) que servirá para conocer el orden de magnitud a tratar.

$\alpha = 30^\circ$					
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0	45	90	135	180
0	43	Imp	Imp	26	29
45	Imp	55	36	38	43
90	Imp	83	62	56	57
135	96	85	69	64	63
180	96	82	70	65	66

Tabla 6. Simulación cuasiestática $\alpha=30^\circ$ inicial

A continuación se repite la simulación reduciendo el intervalo de variación de ángulo a 22.5° para ambas patas. Para cada posición de φ_t se ha resaltado el menor valor del par encontrado. De esta manera se muestra gráficamente la evolución del par en función de la configuración φ_d , φ_t aplicada.

$\alpha = 30^\circ$									
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0	22,5	45	67,5	90	112,5	135	157,5	180
0	43	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	26	27	29
22,5	Imp	47	20	19	22	25	28	31	33
45	Imp	86	55	39	36	36	38	40	43
67,5	Imp	95	76	59	51	49	49	49	51
90	Imp	96	83	70	62	58	56	56	57
112,5	Imp	95	85	74	67	63	61	60	61
135	96	94	85	76	69	66	64	63	63
157,5	96	92	84	76	70	67	65	64	64
180	96	90	82	75	70	67	65	64	66

Tabla 7. Simulación cuasiestática $\alpha=30^\circ$ detallada

Como se puede apreciar en la Tabla 7, existe una tendencia con la que el par se minimiza cuanto menor es el ángulo trasero y encontramos un mínimo en esta tabla que se corresponde con la configuración $\varphi_d = 67,5^\circ$, $\varphi_t = 22,5^\circ$. Las siguientes simulaciones se han realizado en el entorno de este punto, definiendo un intervalo de ángulos más preciso.

$\alpha = 30^\circ$					
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	55	60	65	70	75
20	17	17	18	18	19
22,5	18	18	19	19	20
25	20	20	20	20	21

Tabla 8. Simulación cuasiestática $\alpha=30^\circ$ primera iteración

Realizamos una nueva repetición de simulaciones para aumentar la precisión del estudio. Para ello se disminuye el intervalo de posición de ambas patas a 1° y el valor del par aumenta su precisión añadiendo un decimal.

$\alpha = 30^\circ$							
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	50	51	52	53	54	55	56
14	13,9	14	14,1	14,2	14,3	14,5	14,6
15	14,1	14,2	14,3	14,4	14,5	14,6	14,7
16	14,4	14,4	14,5	14,6	14,7	14,8	14,9
17	14,7	14,8	14,8	14,9	14,9	15	15,1
18	15,2	15,2	15,2	15,2	15,3	15,3	15,4
19	15,7	15,7	15,7	15,7	15,7	15,7	15,8

Tabla 9. Simulación cuasiestática $\alpha=30^\circ$ segunda iteración

Puede apreciarse en la Tabla 9 una tendencia en la que el par disminuye cuando se minimizan los ángulos delantero y trasero. Se ejecutan las simulaciones necesarias para continuar la búsqueda del par mínimo según los resultados obtenidos en esta última tabla.

$\alpha = 30^\circ$										
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
11	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp
12	13,5	13,4	13,4	13,4	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp
13	13,7	13,6	13,5	13,5	13,5	13,5	13,6	13,6	13,7	13,8
14	14,1	13,9	13,8	13,8	13,7	13,7	13,7	13,8	13,8	13,9

Tabla 10. Simulación cuasiestática $\alpha=30^\circ$ tercera iteración

Con estas últimas simulaciones encontramos tres configuraciones en las que el par es mínimo. Entre estas se elige como configuración óptima $\varphi_d = 41^\circ$ y $\varphi_t = 12^\circ$, ya que es la que ofrece una mayor distancia entre la articulación trasera del UGV y el suelo, evitando un posible choque. En la Figura 16 se muestra el vehículo en la configuración de posición óptima para este caso.

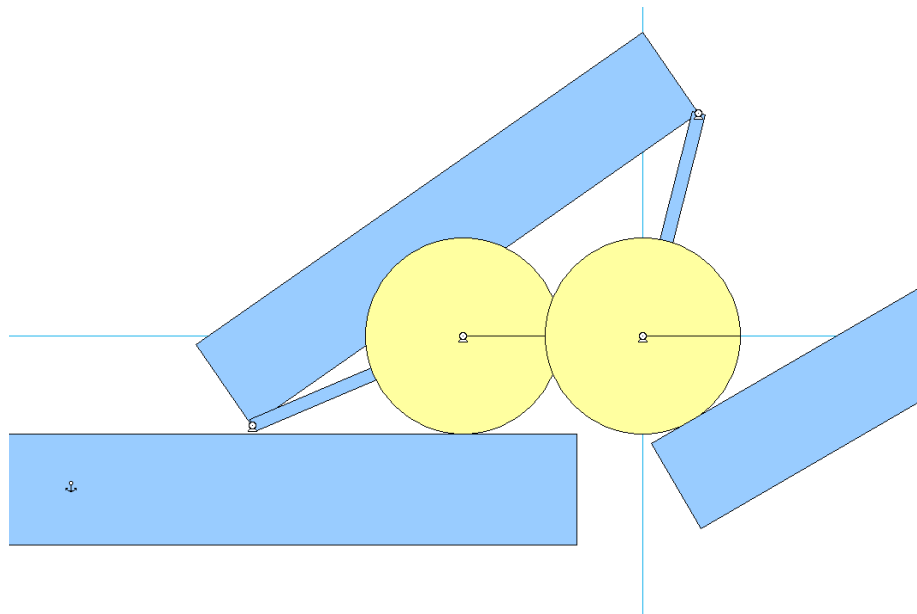


Figura 16. Configuración de mínimo par para una rampa $\alpha=30^\circ$

3.4.2 Otras rampas

Se ha realizado este mismo estudio para otras tres inclinaciones diferentes de la rampa a afrontar: $\alpha=50^\circ$, $\alpha=70^\circ$ y $\alpha=90^\circ$. Con el fin de evitar una memoria demasiado extensa, estas tablas se recogen en el anexo adjunto.

En el estudio cuasiestático del ascenso por una rampa de inclinación α se han realizado 178 simulaciones para cada uno de los casos. Teniendo en cuenta que se han representado cuatro rampas diferentes, el total de simulaciones realizadas es de 712.

3.4.3 Análisis de los resultados

Según los datos obtenidos en este estudio, se puede observar que la posición que debe adoptar el UGV para reducir su par al mínimo posible cuando encuentre en su camino una rampa por la que deba ascender, parte siempre de un ángulo trasero $\phi_t = 12^\circ$.

El ángulo delantero debe reducirse ligeramente cuanto mayor sea la pendiente a ascender.

Al igual que para el estudio de escalón, podemos establecer una configuración genérica para cualquier pendiente en la que el par se reduce al mínimo posible. Esta se define con el ángulo trasero ϕ_t igual a 12° y el delantero ϕ_d igual a 40° .

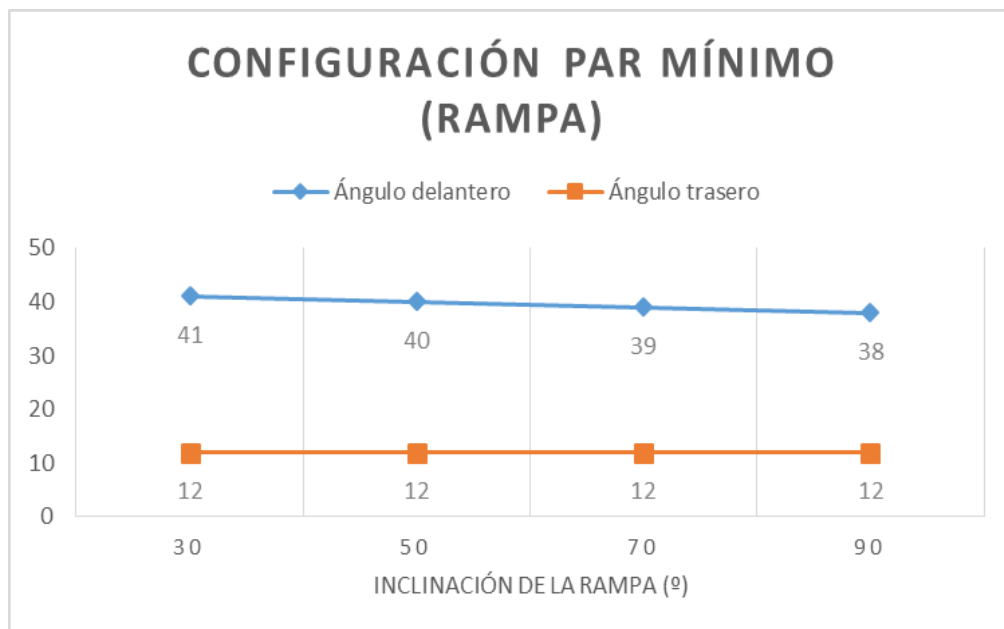


Figura 17. Estudio de la configuración en la que el par es mínimo en función de la inclinación de la rampa

Si analizamos el valor del par necesario para comenzar a subir una rampa, se aprecia que cuanto mayor es la inclinación de dicha rampa, mayor será el par necesario para poder emprender el ascenso.

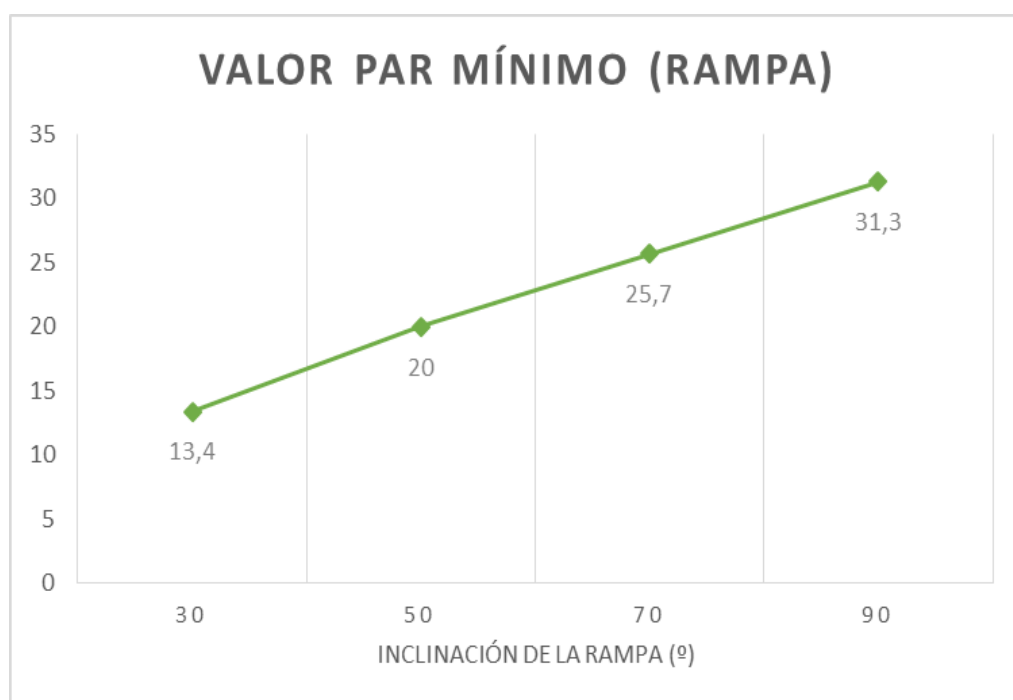


Figura 18. Evolución del par mínimo (N·m) necesario para superar una rampa en función de su inclinación

Capítulo 4

Simulaciones dinámicas

4.1 Introducción

La segunda parte en la que se ha centrado este estudio consiste en realizar simulaciones dinámicas del movimiento del UGV ante el paso de un escalón $h=2r/3$. Para ello se ha recreado una superficie plana sobre la que se sitúa el vehículo y a continuación un escalón de la altura indicada. Se establece una distancia de 0,2 m de separación desde el primer punto de contacto de la rueda delantera hasta el inicio del obstáculo. Desde este punto se iniciará el movimiento del vehículo.

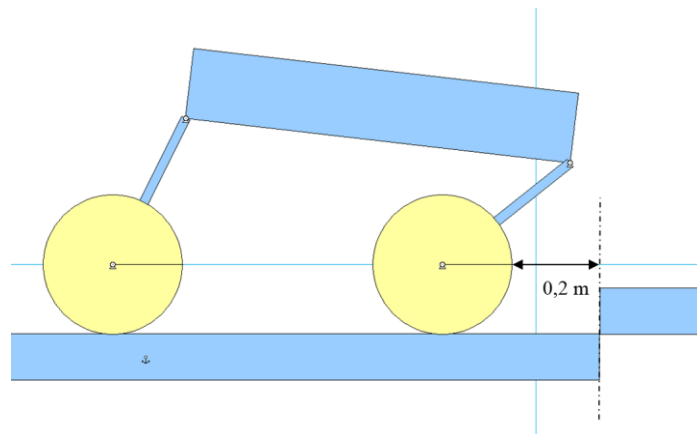


Figura 19. Definición de la distancia inicial al obstáculo para las simulaciones dinámicas

El objetivo principal de estas simulaciones es obtener el tiempo de paso en segundos de cada una de las ruedas sobre el escalón. Consideraremos como tiempo de paso el instante en que el centro de la rueda supera la línea vertical del comienzo del escalón.

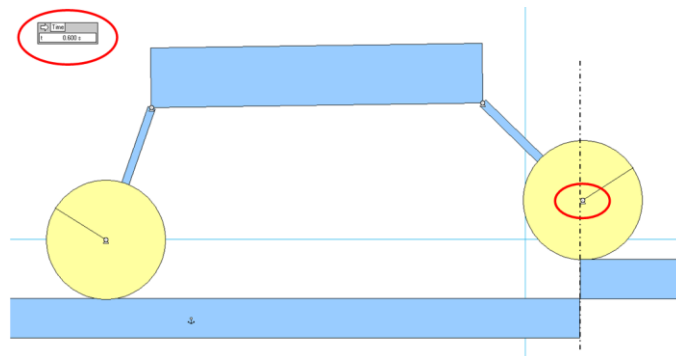


Figura 20. Definición del tiempo de paso de una rueda sobre el obstáculo

Se han realizado dos tipos de simulaciones diferentes. En primer lugar se ha estudiado el tiempo de paso en diferentes configuraciones para unas condiciones de terreno idénticas y varios pares. En este primer grupo se mantienen los coeficientes de rozamiento y el coeficiente de restitución definidos para las simulaciones cuasiestáticas anteriores. El último conjunto de simulaciones se ha realizado estableciendo diferentes valores del coeficiente de rozamiento existente entre las ruedas y la superficie y aplicando el par únicamente en la rueda delantera o en la trasera.

4.2 Tiempo de paso de un escalón $h=2r/3$

En estas simulaciones se ha medido el tiempo de paso de cada una de las ruedas sobre un escalón de altura $h=2r/3$ para las diferentes configuraciones de posición del UGV obtenidas de combinar los ángulos ϕ_d y ϕ_t con variaciones de $22,5^\circ$.

Para cada una de estas posiciones se ha aplicado un mismo par M a la rueda delantera y a la trasera y se han anotado los tiempos de paso de cada una de las ruedas para los siguientes valores de par:

$M=50 \text{ N}\cdot\text{m}$
 $M=75 \text{ N}\cdot\text{m}$
 $M=100 \text{ N}\cdot\text{m}$
 $M=125 \text{ N}\cdot\text{m}$
 $M=150 \text{ N}\cdot\text{m}$
 $M=175 \text{ N}\cdot\text{m}$
 $M=200 \text{ N}\cdot\text{m}$

Para cada uno de estos pares se ha resaltado el tiempo de paso mínimo hallado en las simulaciones.

En las Tablas 11 a 17 se muestran los resultados obtenidos.

Cuando en la celda aparece “-“, lo que se quiere indicar es que la rueda en cuestión no ha sido capaz de pasar el escalón en esa simulación.

Cuando aparece la palabra “Vuelca” se hace referencia a una situación en la que en UGV vuelca sin que la rueda llegue a superar el escalón.

Un asterisco “*” a continuación del tiempo indica que el centro de la rueda ha superado la vertical del inicio de escalón pero vuelca en los instantes siguientes, por lo tanto, estos resultados no serán tenidos en cuenta como válidos.

En el estudio dinámico del tiempo de paso de un escalón de altura $h=r/3$ se han realizado 81 simulaciones para cada uno de los pares aplicados. Teniendo en cuenta que se han empleado 7 valores de par diferentes, el total de simulaciones realizadas es de 567.

M = 50 N·m																		
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0		22,5		45		67,5		90		112,5		135		157,5		180	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	-	-	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,85	-	0,85	-
22,5	Imp	Imp	1,25	Vuelca	1,05	-	0,95	Vuelca	0,9	Vuelca	0,9	-	0,9	2,2	0,9	1,9	0,9	1,9
45	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,25	2,15	1,15	2,1	1,1	2,1
67,5	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
112,5	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
135	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
157,5	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
180	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 11. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=50 \text{ N}\cdot\text{m}$

CAPÍTULO 4: SIMULACIONES dinámicas

M = 75 N·m																		
φ_d φ_t	0		22,5		45		67,5		90		112,5		135		157,5		180	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	-	-	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,7	1,5	0,7	1,5
22,5	Imp	Imp	1,1	Vuelca	0,75	-	0,9	Vuelca	0,85	Vuelca	0,75	-	0,7	1,5	0,7	1,45	0,7	1,45
45	Imp	Imp	-	-	1,1	1,85	0,95	1,8	0,75	1,55	0,75	1,5	0,75	1,5	0,75	1,5	0,75	1,5
67,5	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,85	1,55	0,8	1,55	0,75	1,55
90	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,95	1,75	0,85	1,7	0,8	1,65
112,5	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,1	1,95	0,85	1,75	0,8	1,75
135	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1,9	0,9	1,8	0,8	1,75
157,5	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,95	1,85	0,85	1,8	0,8	1,75
180	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,05	1,95	0,85	1,8	0,8	1,75	0,8	1,75

Tabla 12. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=75 \text{ N}\cdot\text{m}$

M = 100 N·m																		
φ_d φ_t	0		22,5		45		67,5		90		112,5		135		157,5		180	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	0,9	Vuelca	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,6	1,4	0,6	1,35
22,5	Imp	Imp	0,75	Vuelca	0,75	-	0,65	Vuelca	0,8	Vuelca	0,7	-	0,65	Vuelca	0,65	-	0,6	1,3
45	Imp	Imp	1,3	1,7	0,9	Vuelca	0,65	Vuelca	0,65	Vuelca	0,65	-	0,65	1,3	0,65	1,3	0,65	1,3
67,5	Imp	Imp	-	-	1,1	1,55	0,95	1,5	0,75	1,35	0,7	1,3	0,7	1,35	0,65	1,35	0,65	1,35
90	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-	0,75	1,4	0,7	1,35	0,7	1,35	0,65	1,35
112,5	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-	0,75	1,45	0,7	1,4	0,65	1,4	0,65	1,4
135	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	1,1	1,8	0,75	1,45	0,7	1,45	0,65	1,45	0,65	1,4
157,5	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	0,8	1,55	0,75	1,45	0,65	1,45	0,65	1,45	0,65	1,45
180	-	-	-	-	-	-	1,1	1,75	0,75	1,45	0,75	1,45	0,65	1,45	0,65	1,45	0,65	1,45

Tabla 13. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=100 \text{ N}\cdot\text{m}$

4.2 TIEMPO de paso de un escalón $h=2r/3$

M = 125 N·m																		
φ_d φ_t	0		22,5		45		67,5		90		112,5		135		157,5		180	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	0,6	0,9	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,6	1,3	0,6	1,25
22,5	Imp	Imp	0,55	Vuelca	0,6	-	0,6	Vuelca	0,5	Vuelca	0,7	-	0,65	Vuelca	0,6	Vuelca	0,55	1,2*
45	Imp	Imp	0,9	1,5	0,6	Vuelca	0,65	Vuelca	Vuelca	Vuelca	0,6	Vuelca	0,6	Vuelca	0,55	1,25	0,55	1,2
67,5	Imp	Imp	-	-	0,9	1,35	0,55	1,45	0,6	1,15	0,6	1,15	0,6	1,2	0,6	1,2	0,55	1,2
90	Imp	Imp	-	-	-	-	1	1,5	0,65	1,2	0,6	1,2	0,6	1,25	0,6	1,2	0,6	1,25
112,5	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	0,7	1,3	0,65	1,25	0,6	1,25	0,6	1,25	0,6	1,25
135	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	0,65	1,25	0,65	1,25	0,6	1,25	0,6	1,25	0,6	1,25
157,5	Imp	Imp	-	-	-	-	0,75	1,3	0,6	1,25	0,65	1,25	0,6	1,25	0,6	1,25	0,55	1,25
180	-	-	-	-	0,85	1,4	0,65	1,25	0,6	1,25	0,6	1,25	0,6	1,25	0,6	1,25	0,55	1,25

Tabla 14. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=125 \text{ N}\cdot\text{m}$

M = 150 N·m																		
φ_d φ_t	0		22,5		45		67,5		90		112,5		135		157,5		180	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	0,65	0,9	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,55	1,25	0,55	1,2
22,5	Imp	Imp	0,45	Vuelca	0,6	-	0,6	Vuelca	0,5	Vuelca	0,75	1,4	Vuelca	Vuelca	Vuelca	Vuelca	0,55	Vuelca
45	Imp	Imp	1	1,75	0,6	Vuelca	0,65	Vuelca	Vuelca	Vuelca	Vuelca	Vuelca	0,55	Vuelca	0,55	Vuelca	0,5	1,4
67,5	Imp	Imp	1	1,3	0,65	1,55	0,6	Vuelca	0,55	Vuelca	0,55	1,65	0,5	1,2	0,5	1,15	0,5	1,15
90	Imp	Imp	-	-	0,95	1,35	0,6	1,1	0,55	1,05	0,55	1,1	0,55	1,15	0,5	1,15	0,5	1,15
112,5	Imp	Imp	-	-	-	-	0,65	1,1	0,55	1,1	0,55	1,15	0,55	1,15	0,5	1,15	0,5	1,15
135	Imp	Imp	-	-	0,95	1,45	0,65	1,15	0,6	1,15	0,55	1,15	0,55	1,15	0,55	1,15	0,5	1,15
157,5	Imp	Imp	0,85	1,3	0,7	1,2	0,6	1,15	0,6	1,15	0,55	1,15	0,55	1,15	0,55	1,15	0,5	1,15
180	0,7	1,15	0,7	1,15	0,65	1,15	0,6	1,15	0,55	1,15	0,55	1,15	0,5	1,15	0,5	1,15	0,5	1,15

Tabla 15. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=150 \text{ N}\cdot\text{m}$

CAPÍTULO 4: SIMULACIONES dinámicas

M = 175 N·m																		
φ_d φ_t	0		22,5		45		67,5		90		112,5		135		157,5		180	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	0,75	1,2	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,55	1,2	0,55	1,2
22,5	Imp	Imp	0,45	0,7*	0,55	-	0,55	Vuelca	0,5	1,3	0,5	1,1	Vuelca	Vuelca	Vuelca	Vuelca	Vuelca	Vuelca
45	Imp	Imp	0,55	0,85*	0,55	Vuelca	0,45	Vuelca	Vuelca	Vuelca	Vuelca	Vuelca	Vuelca	Vuelca	0,5	Vuelca	0,5	Vuelca
67,5	Imp	Imp	0,95	1,25	0,55	1,1	0,5	Vuelca	0,5	Vuelca	0,5	Vuelca	0,5	Vuelca	0,5	1,15	0,5	1,15
90	Imp	Imp	-	-	0,6	1,05	0,55	1	0,5	1,05	0,5	1,1	0,5	1,1	0,5	1,1	0,5	1,1
112,5	Imp	Imp	0,95	1,35	0,65	1,05	0,55	1	0,5	1,05	0,5	1,05	0,5	1,1	0,5	1,1	0,5	1,1
135	Imp	Imp	0,75	1,15	0,65	1,1	0,55	1,05	0,5	1,05	0,5	1,1	0,5	1,1	0,5	1,1	0,5	1,1
157,5	Imp	Imp	0,7	1,1	0,65	1,1	0,55	1,05	0,5	1,05	0,5	1,05	0,5	1,1	0,5	1,1	0,5	1,1
180	0,65	1,05	0,65	1,05	0,6	1,05	0,55	1,05	0,5	1,05	0,5	1,1	0,5	1,1	0,5	1,1	0,5	1,1

Tabla 16. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=175 \text{ N}\cdot\text{m}$

M = 200 N·m																		
φ_d φ_t	0		22,5		45		67,5		90		112,5		135		157,5		180	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	0,6	0,95	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,5	1,2	0,5	1,2
22,5	Imp	Imp	0,45	0,65*	0,6	0,95*	0,55	1,05	0,5	1,05	0,45	0,85*	Vuelca	Vuelca	Vuelca	Vuelca	Vuelca	Vuelca
45	Imp	Imp	0,5	0,8*	0,4	Vuelca	0,4	Vuelca	0,45	0,9*	Vuelca	Vuelca	Vuelca	Vuelca	Vuelca	Vuelca	0,45	Vuelca
67,5	Imp	Imp	0,6	0,9	0,5	0,9	0,5	Vuelca	0,5	Vuelca	0,5	Vuelca	0,5	Vuelca	0,45	Vuelca	0,45	1,05
90	Imp	Imp	0,65	1	0,5	0,9	0,5	0,95	0,5	1,05	0,45	1,05*	0,45	1,05	0,45	1,1	0,45	1,05
112,5	Imp	Imp	0,7	1,05	0,55	0,95	0,5	0,95	0,5	1	0,45	1,05	0,45	1,05	0,45	1,05	0,45	1,05
135	Imp	Imp	0,65	1,05	0,55	0,95	0,5	1	0,5	1	0,45	1,05	0,45	1,05	0,45	1,05	0,45	1,05
157,5	Imp	Imp	0,6	1	0,55	1	0,5	1	0,5	1	0,45	1,05	0,45	1,05	0,45	1,05	0,45	1,05
180	0,6	1	0,6	1	0,55	1	0,5	1	0,5	1	0,45	1,05	0,45	1,05	0,45	1,05	0,45	1,05

Tabla 17. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=200 \text{ N}\cdot\text{m}$

4.2.1 Análisis de los resultados

Con los resultados obtenidos en estas simulaciones dinámicas se ha generado una gráfica en la que se muestran las configuraciones en las que el tiempo de paso es mínimo para cada uno de los pares.

En algunos de estos pares encontramos más de una configuración con la que se consigue el tiempo mínimo de paso. Se han tenido en cuenta todas ellas y se obtiene la gráfica mostrada en la Figura 21:

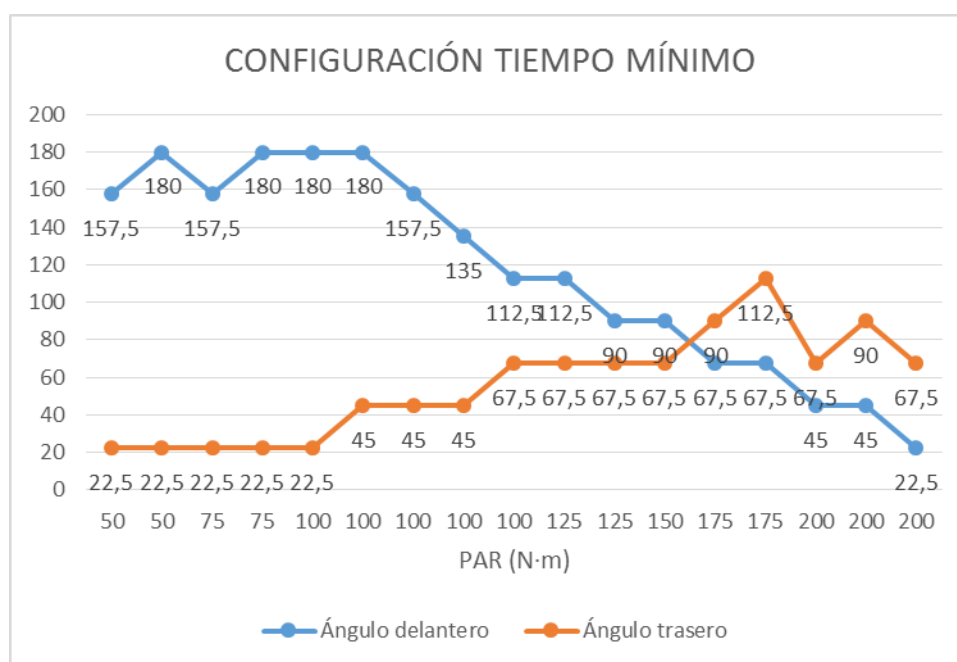


Figura 21. Estudio de la configuración en la que el tiempo de paso es mínimo en función del par M aplicado

Como muestra la gráfica, existe una tendencia clara de cada uno de los ángulos conforme se va aumentando el par. El ángulo ϕ_d tiende a reducirse cuanto mayor es el par M aplicado, mientras que el ángulo trasero ϕ_t va en aumento. Los últimos puntos de la gráfica, correspondientes a $M=200 \text{ N}\cdot\text{m}$ no se han tenido en cuenta en las conclusiones ya que se ha comprobado en las simulaciones que es un valor demasiado alto y el movimiento no es el adecuado puesto que se produce deslizamiento y las ruedas se despegan en exceso del suelo.

A partir de los resultados reflejados en la Figura 21, podemos establecer dos configuraciones recomendadas en función de la necesidad prioritaria en cada momento. Si se busca minimizar el gasto y por tanto que el par aplicado sea lo mínimo posible, se podría elegir cualquiera de los dos resultados obtenidos para el par menor aplicado. De las dos configuraciones posibles se elige aquella en la que el ángulo ϕ_d es mayor, ya que le aporta una mayor estabilidad. Por tanto, la configuración que deberá adoptar el UGV para superar el paso de un escalón de altura $h=2r/3$ optimizando el consumo será $\phi_d=180^\circ$ y $\phi_t=22.5^\circ$. Esta configuración se muestra en la Figura 22.

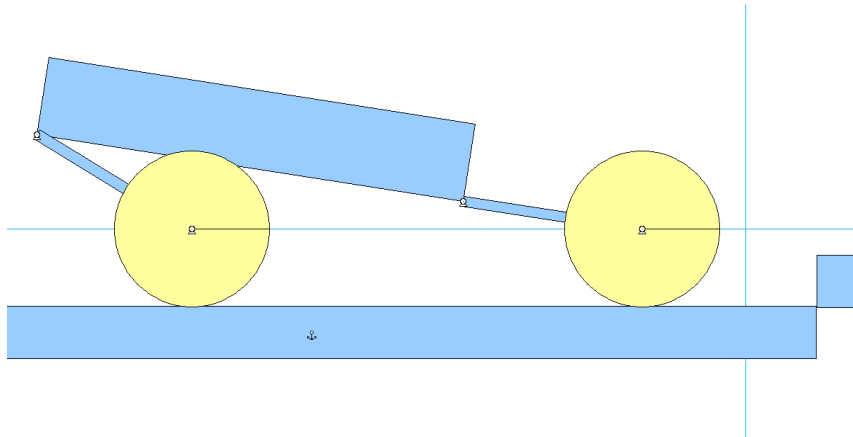


Figura 22. Configuración óptima para superar un escalón $h=2r/3$ cuando el par aplicado M es pequeño

Por el contrario, si en una determinada situación la necesidad principal es superar el obstáculo en el menor tiempo posible, siguiendo el mismo criterio de mayor estabilidad que para el caso del par menor, la configuración que deberá adoptar el vehículo será $\varphi_d = 67.5^\circ$ y $\varphi_t = 112.5^\circ$ (ver Figura 23).

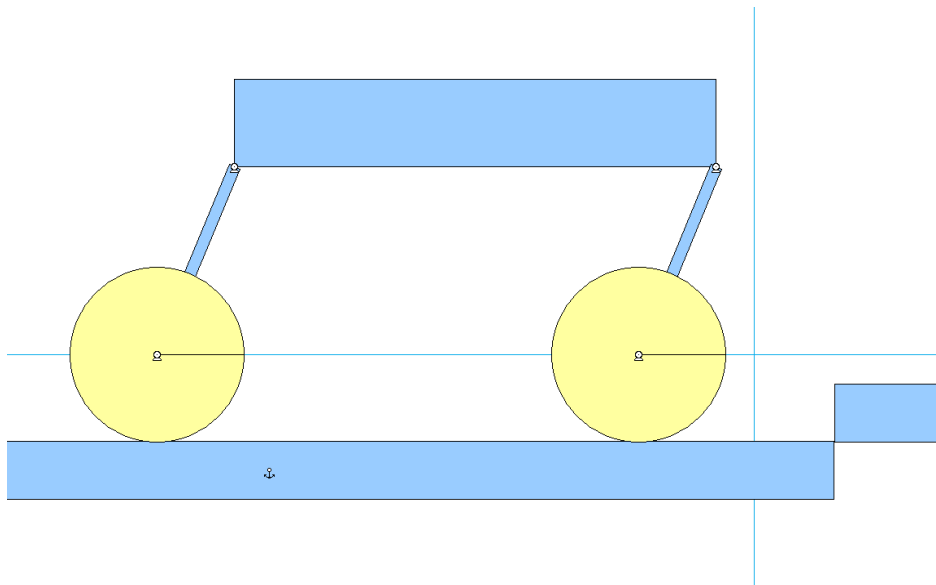


Figura 23. Configuración óptima para superar un escalón $h=2r/3$ en el menor tiempo posible

De los resultados de este estudio se puede obtener una segunda gráfica, reflejada en la Figura 24, que se analizará a continuación. Se ha representado el tiempo mínimo de paso de cada una de las ruedas para cada uno de los pares aplicados. En el caso de que para un mismo par existiesen dos configuraciones con un mismo tiempo mínimo de paso total se ha representado aquel en el que el tiempo de paso de la rueda delantera fuese menor.

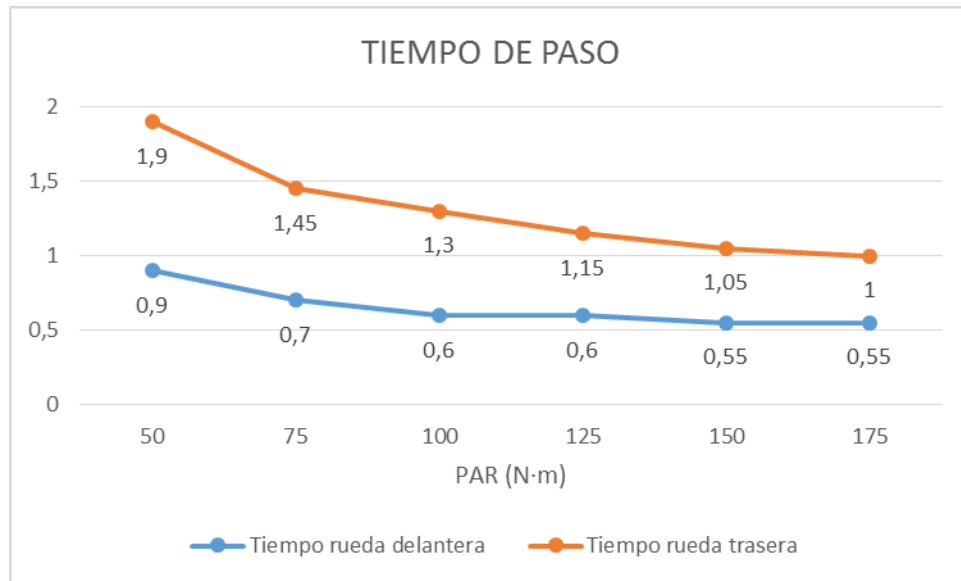


Figura 24. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas del UGV sobre un escalón de altura $h=2r/3$ en función del par M aplicado

Como se puede apreciar, el tiempo de paso de ambas ruedas sobre un escalón de altura $h=2r/3$ disminuye cuanto mayor es el par M aplicado, lo cual era esperable. También se aprecia que a partir de 150 N·m los tiempos de paso no disminuyen significativamente.

4.3 Influencia de la tracción y el coeficiente de rozamiento

En este último conjunto de simulaciones se ha medido el tiempo de paso de cada una de las ruedas sobre un escalón de altura $h=2r/3$ para las diferentes configuraciones de posición del UGV obtenidas de combinar los ángulos ϕ_d y ϕ_t con variaciones de 45° .

Para cada una de estas posiciones se ha aplicado un par M únicamente a una de las ruedas, con el objetivo de analizar la influencia del tipo de tracción, trasera o delantera, que se podría emplear en el UGV y a su vez comparar con la tracción total que se había fijado en los estudios anteriores. Se han realizado las simulaciones con los siguientes valores de par, aplicados primero en la rueda delantera y a continuación en la trasera:

$M=100 \text{ N}\cdot\text{m}$
 $M=150 \text{ N}\cdot\text{m}$
 $M=200 \text{ N}\cdot\text{m}$
 $M=250 \text{ N}\cdot\text{m}$

Además, se han repetido estas simulaciones variando el valor del coeficiente de rozamiento para determinar la influencia de este sobre el tiempo de paso del UGV sobre el obstáculo. Los valores del coeficiente de rozamiento que se han empleado en estas simulaciones son:

$\mu=0.7$
 $\mu=1$
 $\mu=10$
 $\mu=1.000$
 $\mu=100.000$

4.3.1 Coeficiente de rozamiento $\mu=0.7$

En las Tablas 18 a 21 se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los pares, estableciendo un coeficiente de rozamiento $\mu=0,7$ y aplicando tracción delantera.

Se ha resaltado en cada una de ellas el tiempo de paso total mínimo hallado en las simulaciones.

M = 100 N·m										
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,9	-
45	Imp	Imp	-	-	1,2	-	1,2	2,3	-	-
90	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-
135	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-
180	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 18. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=100 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=0.7$

M = 150 N·m										
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,95	-
45	Imp	Imp	-	-	Vuelca	Vuelca	0,9	2,35	0,85	1,8
90	Imp	Imp	-	-	-	-	1,05	1,9	1,05	1,95
135	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-
180	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	1,05	2

Tabla 19. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=150 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=0.7$

4.3 INFLUENCIA de la tracción y el coeficiente de rozamiento

M = 200 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	1	-
45	Imp	Imp	-	-	Vuelca	Vuelca	0,9	-	0,85	1,85
90	Imp	Imp	-	-	0,8	1,55	0,85	1,7	0,75	1,6
135	Imp	Imp	-	-	0,85	1,65	0,8	1,7	0,7	1,6
180	Imp	Imp	-	-	0,8	1,6	0,75	1,65	0,7	1,6

Tabla 20. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=200 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=0.7$

M = 250 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	1,05	-
45	Imp	Imp	-	-	Vuelca	Vuelca	1	-	0,85	1,9
90	Imp	Imp	-	-	0,9	1,65	0,8	1,65	0,7	1,6
135	Imp	Imp	-	-	0,75	1,5	0,7	1,55	0,65	1,5
180	Imp	Imp	0,7	1,35	0,7	1,45	0,65	1,5	0,65	1,45

Tabla 21. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=250 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=0.7$

En el caso de aplicar tracción trasera, los resultados obtenidos han sido los siguientes:

M = 100 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,8	-
45	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-
90	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-
135	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-
180	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 22. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=100 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=0.7$

M = 150 N·m										
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,65	1,4
45	Imp	Imp	0,95	-	-	-	0,8	1,5	0,75	1,5
90	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	1	1,9
135	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	1,05	2
180	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	0,85	1,85

Tabla 23. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=150 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=0.7$

M = 200 N·m										
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,55	1,2
45	Imp	Imp	0,85	Vuelca	0,75	-	0,65	1,25	0,6	1,25
90	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	0,65	1,4
135	Imp	Imp	-	-	-	-	1,05	1,8	0,7	1,5
180	Imp	Imp	-	-	-	-	0,75	1,55	0,65	1,5

Tabla 24. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=200 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=0.7$

M = 250 N·m										
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,5	1,05
45	Imp	Imp	0,8	Vuelca	0,65	Vuelca	0,55	1,05	0,55	1,1
90	Imp	Imp	-	-	-	-	0,95	1,55	0,6	1,25
135	Imp	Imp	-	-	-	-	0,7	1,4	0,65	1,4
180	Imp	Imp	-	-	-	-	0,7	1,4	0,6	1,4

Tabla 25. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=250 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=0.7$

4.3.2 Otros coeficientes de rozamiento

Este mismo proceso se ha repetido para otros cuatro valores diferentes del coeficiente de rozamiento: $\mu=1$, $h=10$, $\mu=1.000$ y $\mu=100.000$. Con el fin de evitar una memoria demasiado extensa, estas tablas se recogen en el anexo adjunto.

En el estudio cuasiestático del paso de un escalón de diferentes alturas se han tenido en cuenta 25 configuraciones de posición diferentes para cada uno de los pares, coeficientes de rozamiento y tipos de tracción considerados. Teniendo en cuenta que se han aplicado cuatro pares diferentes, cinco valores distintos del coeficiente de rozamiento y dos tipos de tracción, el total de simulaciones realizadas es de 1.000.

4.3.3 Análisis de los resultados

En primer lugar se analizará gráficamente el conjunto de las configuraciones en las que el tiempo de paso es mínimo para cada uno de los pares en los dos tipos de tracción empleados. Se han empleado los datos de las simulaciones con el coeficiente de rozamiento más alto ya que en este caso el deslizamiento de las ruedas es menor y se producen menos saltos y rebotes, por lo que el paso del escalón se produce de una manera más uniforme.

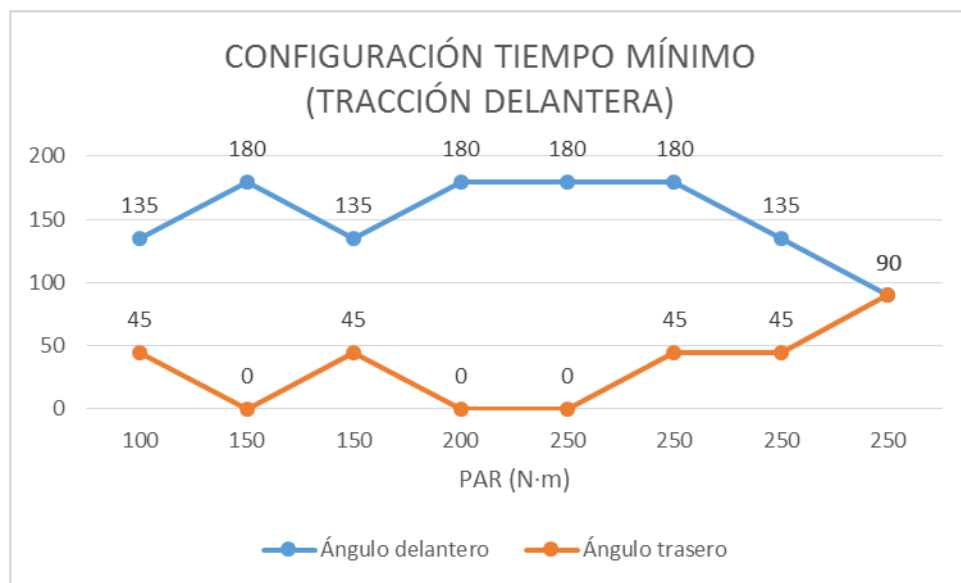


Figura 25. Estudio de la configuración en la que el tiempo de paso es mínimo en función del par M aplicado con tracción delantera

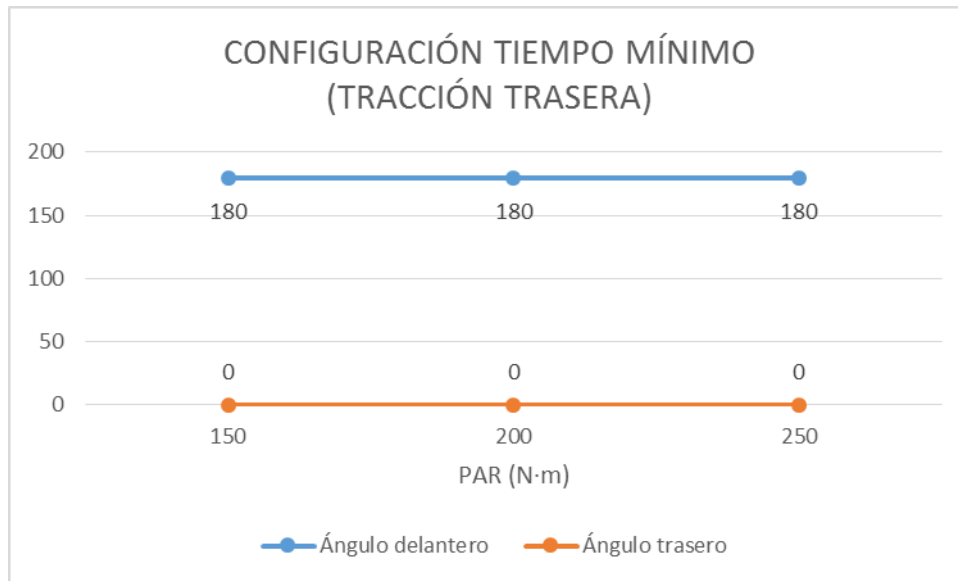


Figura 26. Estudio de la configuración en la que el tiempo de paso es mínimo en función del par M aplicado con tracción trasera

Comparando ambas gráficas y las tablas anteriores se puede ver que aplicando el mismo valor de par encontramos más configuraciones de posición en las que el UGV es capaz de superar el obstáculo por completo si dicho par se aplica sobre la rueda delantera que si se aplica sobre la trasera.

Si analizamos la gráfica con los resultados obtenidos durante las simulaciones realizadas con tracción delantera podemos establecer una configuración óptima de paso formada por un ángulo delantero $\phi_d=135^\circ$ y un ángulo trasero $\phi_t=45^\circ$. Elegimos esta configuración (mostrada en la Figura 27) porque es válida tanto si se pretende aplicar un par lo más pequeño posible y reducir el consumo como si lo que se busca es lograr el menor tiempo posible.

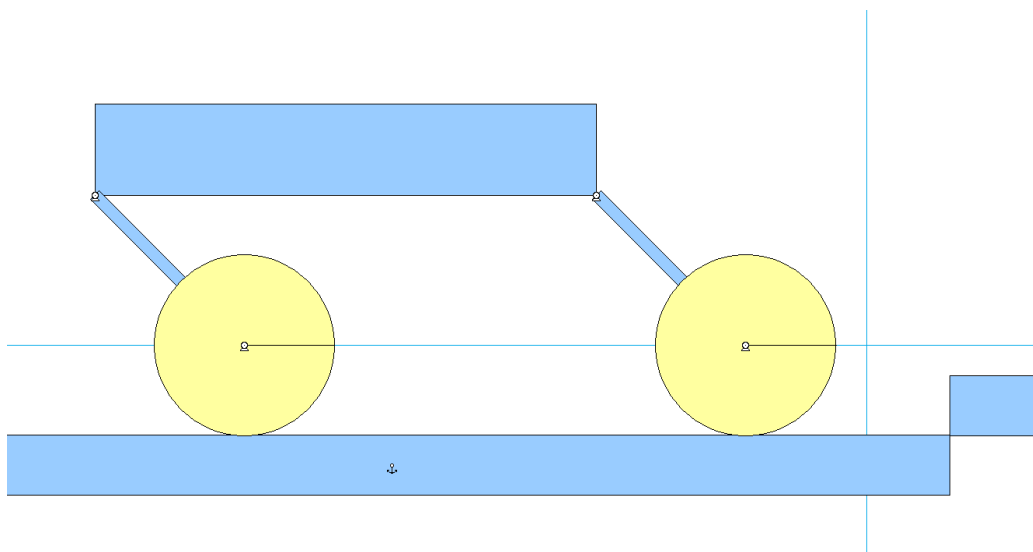


Figura 27. Configuración óptima para superar un escalón $h=2r/3$ con tracción delantera

4.3 INFLUENCIA de la tracción y el coeficiente de rozamiento

En el caso de la tracción trasera el resultado es unánime en todas las simulaciones y el tiempo mínimo de paso del escalón se consigue configurando el UGV en la posición definida por $\phi_d=180^\circ$ y un ángulo trasero $\phi_t=0^\circ$. En la Figura 28 se muestra en vehículo en dicha posición.

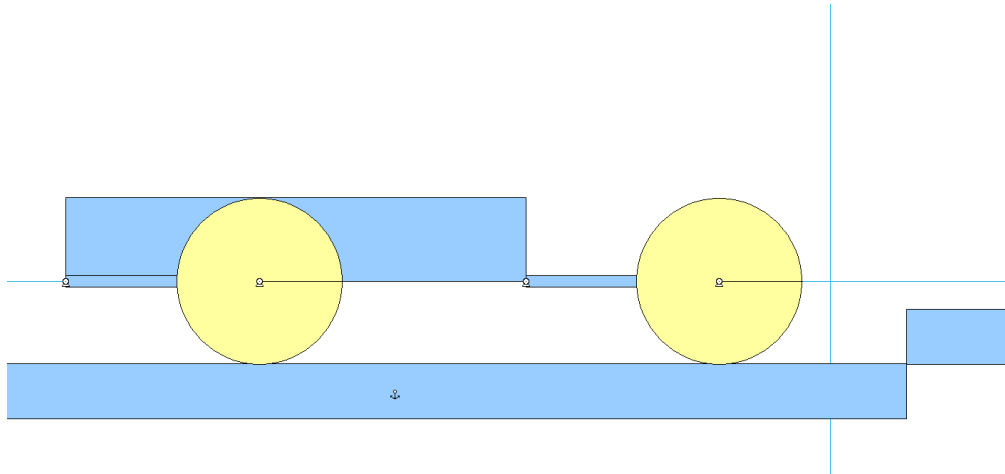


Figura 28. Configuración óptima para superar un escalón $h=2r/3$ con tracción trasera

Para estudiar la influencia del coeficiente de rozamiento se ha representado el tiempo de paso de cada una de las ruedas en una misma configuración y con un mismo par aplicado en los dos tipos de tracción en función del coeficiente de rozamiento establecido. Se han elegido dos configuraciones en las que se ha conseguido que el UGV supere el obstáculo por completo con el par más pequeño posible.

Las dos configuraciones a las que hacen referencia las gráficas son $\phi_d=135^\circ$ y $\phi_t=45^\circ$ en la primera de ellas y $\phi_d=180^\circ$ y $\phi_t=90^\circ$ en la segunda. En ambos casos los resultados son los obtenidos de aplicar un par $M=150 \text{ N}\cdot\text{m}$.

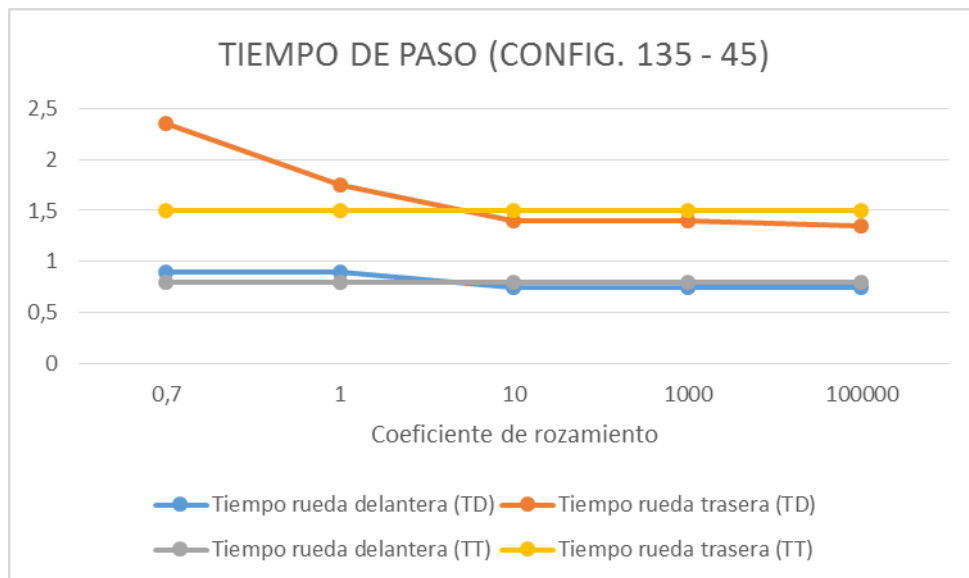


Figura 29. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas del UGV sobre un escalón de altura $h=2r/3$ en función del coeficiente de rozamiento (config. $135^\circ-45^\circ$)

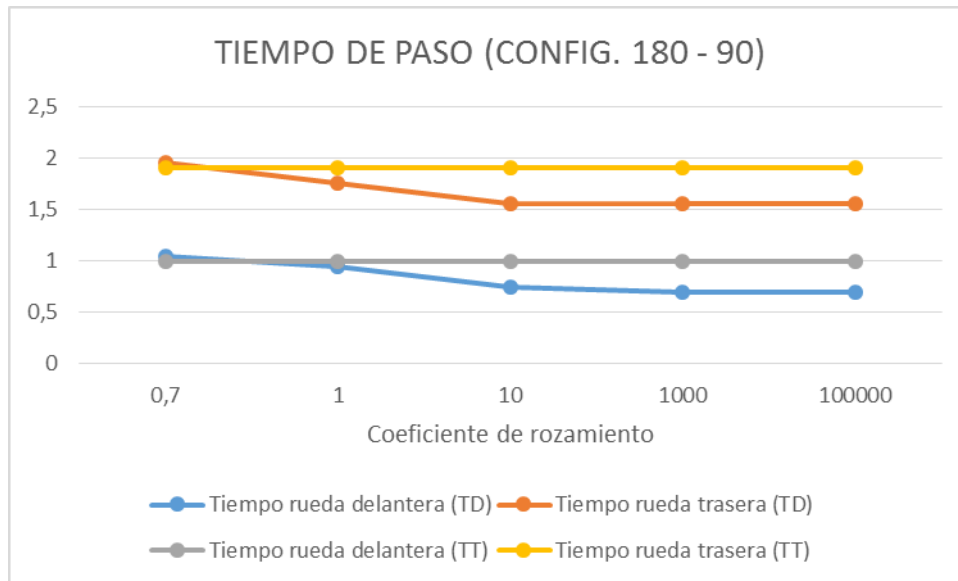


Figura 30. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas del UGV sobre un escalón de altura $h=2r/3$ en función del coeficiente de rozamiento (config. $180^\circ-90^\circ$)

A la luz de los resultados mostrados en las gráficas de la Figuras 29 y 30, podemos concluir que en un UGV dotado de un sistema de tracción delantera el tiempo de paso de un escalón se ve reducido cuando el coeficiente de rozamiento es mayor. Para valores muy altos del coeficiente de rozamiento, a partir de $\mu=10$ la diferencia no es apreciable.

Por el contrario, en caso de que el UGV estuviese dotado de un sistema de tracción trasera el tiempo de paso del escalón no se ve afectado por el coeficiente de rozamiento.

Pese a que el menor tiempo total de paso de todos los obtenidos se consigue con un sistema de tracción trasera, como norma general, según los resultados obtenidos se recomendaría un sistema de tracción delantera, ya que para un mismo par es capaz de superar el obstáculo con una mayor cantidad de posiciones posibles. Además, permite superar el escalón propuesto con un par menor, pues como se puede apreciar en las tablas de resultados, con un par $M=100 \text{ N}\cdot\text{m}$ en tracción trasera no es capaz de completar el paso.

Capítulo 5

Conclusiones y Trabajos futuros

5.1 Conclusiones

El objetivo principal de este proyecto se ha alcanzado utilizando la herramienta Working Model. Con este software se ha realizado el estudio del paso por obstáculos de un vehículo terrestre no tripulado.

En base a las más de 3.000 simulaciones realizadas con este programa a lo largo del proyecto y los resultados obtenidos de ellas, se pueden resaltar las siguientes conclusiones.

En el estudio cuasiestático del paso de un escalón se obtiene una configuración inicial recomendada que no depende de la altura de dicho escalón. La posición definida por los ángulos $\varphi_d=40^\circ$ y $\varphi_t=12^\circ$ es la que consigue que el par requerido sea mínimo. Esta configuración debe ser modificada a lo largo del movimiento, pues con ella no es capaz de hacer el paso completo ya que la pata trasera colisiona con el suelo.

En el estudio cuasiestático del ascenso del UGV por una rampa podemos establecer una configuración inicial para cualquier pendiente en la que el par se reduce al mínimo posible. Esta viene definida por los ángulos $\varphi_t=40^\circ$ y $\varphi_d=12^\circ$. Al igual que en el caso del escalón, no es una configuración válida para completar el movimiento.

El par necesario para iniciar el movimiento ante un obstáculo (escalón o rampa) es menor cuanto menor sea la altura y/o inclinación del mismo.

La configuración que deberá adoptar el UGV para superar por completo el paso de un escalón de altura $h=r/3$ sin variar su posición y cumpliendo el objetivo principal de este proyecto de optimizar el consumo será $\phi_d=180^\circ$ y $\phi_t=22.5^\circ$.

Por el contrario, si la prioridad requerida en un momento determinado fuese la de superar dicho obstáculo en el menor tiempo posible se recomendaría una configuración $\phi_d=67.5^\circ$ y $\phi_t=112.5^\circ$. Ha de tenerse en cuenta que, cuanto mayor sea el par aplicado, menor será el tiempo de paso del obstáculo. No obstante, no se recomienda emplear valores de par demasiado altos puesto que no disminuyen los tiempos de paso de manera significativa; además, los rebotes son mayores, se pierde agarre y disminuye la estabilidad.

Con tracción delantera podemos establecer una configuración óptima de paso completo del escalón formada por los ángulos $\phi_d=135^\circ$ y $\phi_t=45^\circ$. Esta configuración sería válida tanto si se pretende minimizar el par aplicado como si lo que se busca es lograr el menor tiempo de paso posible.

En un UGV dotado de un sistema de tracción delantera el tiempo de paso de un escalón se ve reducido cuando el coeficiente de rozamiento es mayor. Para valores muy altos del coeficiente de rozamiento, a partir de $\mu=10$, la diferencia no es apreciable. Sin embargo, en el caso de tracción trasera el tiempo de paso no se ve afectado por el coeficiente de rozamiento.

En la medida de lo posible se recomienda la tracción a las cuatro ruedas de la que dispone el UGV estudiado. Se ha comprobado que es capaz de superar el obstáculo por completo en una mayor cantidad de configuraciones diferentes si dicho par se aplica sobre la rueda delantera que si se aplica sobre la trasera. Por lo tanto, En caso de no poder contar con tracción total, se elegirá tracción delantera.

5.2 Trabajos futuros

Se proponen tres futuros estudios posibles a partir de los realizados en este proyecto.

A lo largo de todos los casos representados en este estudio se ha considerado un coeficiente de restitución de valor 0 para evitar rebotes y que las simulaciones fuesen lo más uniformes posibles. Con el fin de ampliar el estudio y conocer la influencia de los diferentes parámetros implicados en el movimiento, se podrían realizar las simulaciones de este estudio variando el coeficiente de restitución.

Otra alternativa que se propone es la de sustituir en Working Model la pata delantera del vehículo por un muelle definido por una constante elástica k , de manera que simulase un sistema de amortiguación. Se propone realizar las simulaciones de este estudio para diferentes valores k y analizar su influencia en el movimiento.

Capítulo 5: CONCLUSIONES y Trabajos futuros

Por último, resultaría beneficioso estudiar diferentes tipos de obstáculos que el vehículo pudiera encontrar en el camino. En este proyecto únicamente se han analizado escalones y rampas, pero podría analizarse en paso por obstáculos irregulares o por una superficie definida por una función $f(x)$.

Capítulo 6

Presupuesto

6.1 Introducción

A continuación se presentará una estimación de los costes de este proyecto. Para ello se analizarán las diferentes fases en las que se ha dividido, así como el tiempo empleado en cada una de las tareas.

Se calcularán los costes del personal requerido para desarrollar estas tareas y los costes del material empleado.

Se considerará una jornada laboral de 4 horas al día.

6.2 Desarrollo del proyecto

6.2.1 Fase de Análisis

Durante esta fase se plantean diversas opciones del proyecto a abordar, se analiza el caso planteado y se crea una estructura de desarrollo.

La duración de esta fase ha sido de 5 días (20 horas).

6.2.2 Fase de diseño

Esta fase comprende el análisis de las dimensiones del vehículo real, así como su diseño en la herramienta utilizada.

La duración de esta fase ha sido de 5 días (20 horas).

6.2.3 Fase de desarrollo

En esta fase se realizan todas las simulaciones planteadas durante la fase de análisis, se examinan los resultados obtenidos y se obtienen las principales conclusiones.

La duración de esta fase ha sido de 35 días (140 horas)

6.2.4 Fase de documentación

Durante esta última fase se reúne toda la información obtenida de las fases anteriores y se documenta la memoria del proyecto.

La duración de esta fase ha sido de 25 días (100 horas)

El de tiempo empleado para completar todas las fases del proyecto asciende a un total de 280 horas.

En la Figura 31 se muestra el diagrama de Gantt correspondiente a estas fases:

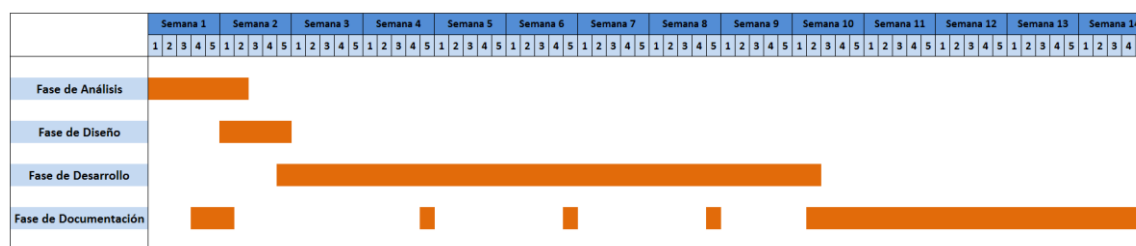


Figura 31. Diagrama de Gantt

6.3 Costes

6.3.1 Costes de personal

APELLIDOS Y NOMBRE	CATEGORÍA	HORAS DEDICADAS AL PROYECTO	PRECIO UNITARIO (€/h)	TOTAL PRECIO (€)
Robles San Martín, Leticia	Ingeniero Técnico	280	30	8400
Meneses Alonso, Jesús	Consultor	40	80	3200
TOTAL:				11.600,00 €

6.3.2 Costes de material y herramientas

DESCRIPCIÓN	COSTE (€)	% USO DEDICADO AL PROYECTO	DEDICACIÓN (MESES)	PERIODO DE DEPRECIACIÓN (MESES)	COSTE IMPUTABLE
Ultrabook ThinkPad S540	1062,3	100	3,5	60	61,97
Office Professional 2010	242	100	3,5	36	23,53
Working Model 2D Professional License for six (6) months	795	100	3,5	6	463,75
TOTAL:					549,25 €

Teniendo en cuenta los costes generados por el personal, así como los debidos a las herramientas empleadas, el presupuesto total de este proyecto asciende a la cantidad de **DOCE MIL CIENTO CUARENTA Y NUEVE EUROS CON VEINTICINCO CÉNTIMOS**.

Leganés a 5 de Octubre de 2015

El ingeniero proyectista

Fdo. Leticia Robles San Martín

PRESUPUESTO

Referencias

- [1] Douglas W. Gage: "Special Issue on Unmanned Ground Vehicles" Unmanned Systems Magazine, Summer 1995, volume 13, number 3
- [2] http://blackirobotics.com/Home_Page.html. Accedido en Abril 2015.
- [3] <http://science.howstuffworks.com/military-robot.htm>. Accedido en Abril 2015.
- [4] Tallinn University of Technology, Dept. of Mechatronics, "Universal Ground Vehicle", Research proj. L523, 2005-2008.
- [5] Shuanghui, H.; Yong, L; Minghui, H. Study on a Novel Absolute Magnetic Encoder. In Proc. of the 2008 IEEE. 2008. 1773-1776.
- [6] Tallinn University of Technology, Department of Mechatronics, "Proactivity and Behavioural Models of Mechatronic and Production Systems", Research project SF0140113Bs08, 2008-2013.
- [7] Eduardo Corral, Gennady Aryassov, Jesús Meneses. "A quasi-static approach to optimize the motion of an UGV depending on the track profile". Mechatronic Systems and Materials (MSM 2013), 1-7, Vilnius, Lituania, 01-03 Julio, 2013.

Anexo

Tablas de resultados de la simulación cuasiestática del paso de un escalón $h=r/2$

$h=r/2$					
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0	45	90	135	180
0	68	Imp	Imp	58	64
45	Imp	108	77	86	98
90	Imp	181	139	131	133
135	Imp	193	162	150	150
180	216	189	165	155	153

Tabla 26. Simulación cuasiestática $h=r/2$ inicial

$h=r/2$									
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0	22,5	45	67,5	90	112,5	135	157,5	180
0	63	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	51	53	57
22,5	Imp	75	34	34	41	48	55	61	68
45	Imp	146	96	71	67	70	75	80	84
67,5	Imp	172	139	111	99	94	94	97	102
90	Imp	181	158	134	119	115	109	111	115
112,5	Imp	183	165	146	133	126	121	120	121
135	Imp	183	167	151	139	133	126	125	126
157,5	188	181	166	152	141	136	125	128	128
180	187	178	163	151	141	136	130	128	129

Tabla 27. Simulación cuasiestática $h=r/2$ detallada

$h=r/2$					
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	35	40	45	50	55
20	37	32	30	29	29
22,5	44	38	34	32	32
25	52	44	39	37	36

Tabla 28. Simulación cuasiestática $h=r/2$ primera iteración

h=r/2							
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	47	48	49	50	51	52	53
14	24,1	24,2	24,4	24,7	24,9	25	25,4
15	24,4	24,6	24,7	24,9	25,1	25,3	25,5
16	25	25,1	25,2	25,4	25,5	25,7	25,9
17	25,7	25,8	25,8	25,9	26	26,2	26,4
18	26,6	26,6	26,6	26,6	26,7	26,9	27
19	27,7	27,6	27,6	27,6	27,6	27,7	27,8

Tabla 29. Simulación cuasiestática h=r/2 segunda iteración

h=r/2									
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	38	39	40	41	42	43	44	45	46
11	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp
12	22,9	22,8	22,7	22,6	22,7	Imp	Imp	Imp	Imp
13	23,4	23,2	23,1	23	23	23	23,1	23,2	23,3
14	24,1	23,8	23,6	23,5	23,4	23,4	23,4	23,5	23,5

Tabla 30. Simulación cuasiestática h=r/2 tercera iteración

Tablas de resultados de la simulación cuasiestática del paso de un escalón $h=2r/3$.

$h=2r/3$					
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0	45	90	135	180
0	68	Imp	Imp	58	64
45	Imp	108	77	86	98
90	Imp	181	139	131	133
135	Imp	193	162	150	150
180	216	189	165	155	153

Tabla 31. Simulación cuasiestática $h=2r/3$ inicial

$h=2r/3$									
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0	22,5	45	67,5	90	112,5	135	157,5	180
0	68	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	58	61	64
22,5	Imp	82	38	39	48	56	63	70	76
45	Imp	164	108	81	77	81	86	92	98
67,5	Imp	195	159	128	114	111	111	114	118
90	Imp	207	181	155	139	133	131	131	133
112,5	Imp	211	190	168	154	146	143	143	144
135	Imp	211	193	174	162	154	150	149	150
157,5	Imp	210	192	176	165	158	154	152	153
180	216	206	189	174	165	158	155	153	153

Tabla 32. Simulación cuasiestática $h=2r/3$ detallada

$h=2r/3$					
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	35	40	45	50	55
20	43	36	33	33	33
22,5	50	42	38	37	36
25	57	49	44	41	41

Tabla 33. Simulación cuasiestática $h=2r/3$ primera iteración

h=2r/3							
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	47	48	49	50	51	52	53
14	28,9	29,2	29,2	29,4	29,2	29,2	29,6
15	29,3	29,5	29,8	30	29,9	29,6	29,9
16	30,1	30,1	30,4	30,6	30,4	30,2	30,2
17	31	31,1	31,2	31,1	31	30,8	30,9
18	32,1	32	31,9	31,7	31,6	31,5	3,7
19	33	32,7	32,5	32,5	32,3	32,5	32,6

Tabla 34. Simulación cuasiestática h=2r/3 segunda iteración

h=2r/3									
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	38	39	40	41	42	43	44	45	46
11	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp
12	25,6	25,5	25,5	25,5	25,5	25,8	Imp	Imp	Imp
13	26,2	26	25,9	25,8	25,8	25,9	25,9	26,1	26,3
14	26,9	26,7	26,5	26,4	26,3	26,3	26,3	26,4	26,5

Tabla 35. Simulación cuasiestática h=2r/3 tercera iteración

Tablas de resultados de la simulación cuasiestática del paso de un escalón $h=5r/6$

$h=5r/6$					
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0	45	90	135	180
0	73	Imp	Imp	66	74
45	Imp	120	87	98	112
90	Imp	205	161	151	154
135	Imp	221	186	174	174
180	248	217	190	180	183

Tabla 36. Simulación cuasiestática $h=5r/6$ inicial

$h=5r/6$									
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0	22,5	45	67,5	90	112,5	135	157,5	180
0	73	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	66	70	74
22,5	Imp	89	42	43	53	63	72	80	87
45	Imp	180	120	91	87	92	98	105	112
67,5	Imp	Imp	178	144	130	126	128	132	137
90	Imp	234	205	176	161	153	151	152	154
112,5	Imp	240	217	193	177	169	166	165	167
135	Imp	241	221	201	186	179	174	174	174
157,5	Imp	240	221	203	190	183	179	178	178
180	248	236	217	202	190	184	180	179	183

Tabla 37. Simulación cuasiestática $h=5r/6$ detallada

$h=5r/6$					
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	35	40	45	50	55
20	44	39	37	36	36
22,5	53	46	42	40	40
25	62	53	48	45	44

Tabla 38. Simulación cuasiestática $h=5r/6$ primera iteración

h=5r/6							
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	47	48	49	50	51	52	53
14	29,7	29,9	30,2	30,2	30,8	31	31,5
15	30,1	30,3	30,6	30,8	31,1	31,4	31,7
16	30,8	30,9	31,1	31,3	31,6	31,9	32,2
17	31,7	31,8	31,9	32,1	32,3	32,5	32,8
18	32,8	32,8	32,9	33	33,1	33,3	33,5
19	34,1	34,1	34,1	34,1	34,2	34,3	34,5

Tabla 39. Simulación cuasiestática h=5r/6 segunda iteración

h=5r/6									
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	38	39	40	41	42	43	44	45	46
11	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp
12	28,2	28,2	28,1	28,2	28,3	28,5	Imp	Imp	Imp
13	28,8	28,6	28,6	28,5	28,6	28,7	28,8	29	29,2
14	29,7	29,4	29,2	29,2	29,1	29,1	29,2	29,3	29,5

Tabla 40. Simulación cuasiestática h=5r/6 tercera iteración

Tablas de resultados de la simulación cuasiestática del paso de un escalón $h=r$

h=r					
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0	45	90	135	180
0	Imp	Imp	Imp	78	87
45	Imp	133	98	116	133
90	Imp	236	188	176	185
135	Imp	257	221	209	201
180	Imp	256	227	210	217

Tabla 41. Simulación cuasiestática $h=r$ inicial

h=r									
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0	22,5	45	67,5	90	112,5	135	157,5	180
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	78	83	87
22,5	Imp	97	45	48	61	73	85	94	102
45	Imp	Imp	133	103	98	106	116	125	133
67,5	Imp	Imp	201	164	149	144	153	157	162
90	Imp	Imp	236	203	188	176	176	183	185
112,5	Imp	251	251	225	210	201	191	193	195
135	Imp	279	257	234	221	208	204	203	201
157,5	Imp	279	260	239	226	218	207	205	208
180	Imp	276	256	238	227	214	210	209	217

Tabla 42. Simulación cuasiestática $h=r$ detallada

h=r					
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	35	40	45	50	55
20	48	43	40	40	41
22,5	58	50	46	45	45
25	68	59	54	50	50

Tabla 43. Simulación cuasiestática $h=r$ primera iteración

h=r							
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	45	46	47	48	49	50	51
14	32,5	32,7	32,7	32,8	33,4	33,2	34,2
15	33,1	33,2	33,4	33,6	33,8	34,1	34,6
16	33,9	34	34,1	34,3	34,5	34,7	35,1
17	35,1	35,1	35,2	35,2	35,3	35,5	35,8
18	36,3	36,3	36,4	36,4	36,5	36,6	36,8
19	37,5	37,5	37,5	37,7	37,9	38,1	38,6

Tabla 44. Simulación cuasiestática h=r segunda iteración

h=r										
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46
11	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp
12	30,9	30,7	30,7	30,7	31,1	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp
13	32,4	31,6	31,5	31,1	31,5	31,6	31,7	31,9	32,1	32,3
14	33,4	32,5	32	32,2	31,7	31,7	31,8	31,9	32,5	32,7

Tabla 45. Simulación cuasiestática h=r tercera iteración

Tablas de resultados de la simulación cuasiestática del paso de una rampa $\alpha=50^\circ$

$\alpha = 50^\circ$					
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0	45	90	135	180
0	57	Imp	Imp	42	46
45	Imp	83	57	62	70
90	Imp	133	100	93	94
135	Imp	139	115	106	105
180	155	135	116	109	107

Tabla 46. Simulación cuasiestática $\alpha=50^\circ$ inicial

$\alpha = 50^\circ$									
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0	22,5	45	67,5	90	112,5	135	157,5	180
0	57	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	42	44	46
22,5	Imp	67	29	29	35	40	46	50	54
45	Imp	128	83	61	57	58	62	66	70
67,5	Imp	147	119	94	83	79	80	81	84
90	Imp	152	133	112	100	95	93	93	94
112,5	Imp	153	138	121	110	104	101	100	101
135	Imp	153	139	125	115	109	106	105	105
157,5	156	150	138	125	116	111	108	107	107
180	155	148	135	124	116	111	109	107	107

Tabla 47. Simulación cuasiestática $\alpha=50^\circ$ detallada

$\alpha = 50^\circ$					
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	45	50	55	60	65
20	26	25	25	26	27
22,5	30	28	27	28	29
25	34	32	31	30	31

Tabla 48. Simulación cuasiestática $\alpha=50^\circ$ primera iteración

$\alpha = 50^\circ$							
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	49	50	51	52	53	54	55
14	20,9	21	21,3	21,4	21,7	21,9	22,1
15	21,2	21,4	21,5	21,7	21,9	22	22,3
16	21,7	21,7	21,9	22	22,2	22,3	22,5
17	22,2	22,3	22,3	22,5	22,6	22,7	22,9
18	22,9	22,9	23	23	23,1	23,3	23,4
19	23,7	23,7	23,7	23,8	23,8	23,9	24

Tabla 49. Simulación cuasiestática $\alpha=50^\circ$ segunda iteración

$\alpha = 50^\circ$											
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
11	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp
12	20,1	20	20	20	20,1	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp
13	20,5	20,3	20,2	20,2	20,2	20,2	20,3	20,4	20,5	20,7	20,8
14	21	20,8	20,7	20,6	20,6	20,5	20,6	20,6	20,7	20,8	20,9

Tabla 50. Simulación cuasiestática $\alpha=50^\circ$ tercera iteración

Tablas de resultados de la simulación cuasiestática del paso de una rampa $\alpha=70^\circ$

$\alpha = 70^\circ$					
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0	45	90	135	180
0	68	Imp	Imp	58	64
45	Imp	108	78	86	98
90	Imp	182	140	132	135
135	Imp	194	163	152	151
180	216	190	166	153	154

Tabla 51. Simulación cuasiestática $\alpha=70^\circ$ inicial

$\alpha = 70^\circ$									
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0	22,5	45	67,5	90	112,5	135	157,5	180
0	68	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	58	61	64
22,5	Imp	83	38	39	47	56	63	70	76
45	Imp	165	108	81	78	81	86	92	98
67,5	Imp	196	159	128	115	111	112	115	119
90	Imp	208	182	156	140	134	132	132	135
112,5	Imp	212	191	169	155	147	144	144	145
135	Imp	212	194	175	163	155	152	150	151
157,5	218	211	193	177	166	159	155	154	154
180	216	207	190	176	166	159	153	154	154

Tabla 52. Simulación cuasiestática $\alpha=70^\circ$ detallada

$\alpha = 70^\circ$						
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	35	40	45	50	55	60
20	41	36	33	33	33	34
22,5	49	42	38	36	36	37
25	57	49	44	41	40	40

Tabla 53. Simulación cuasiestática $\alpha=70^\circ$ primera iteración

$\alpha = 70^\circ$							
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	47	48	49	50	51	52	53
14	26,9	27,1	27,3	27,4	27,8	28	28,4
15	27,4	27,5	27,7	27,9	28,1	28,4	28,7
16	28	28,1	28,2	28,4	28,6	28,8	29,1
17	28,8	28,8	28,9	29,1	29,2	29,4	29,6
18	29,8	29,8	29,8	29,9	30	30,1	30,3
19	31	30,9	30,9	30,9	31	31,1	31,2

Tabla 54. Simulación cuasiestática $\alpha=70^\circ$ segunda iteración

$\alpha = 70^\circ$										
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
11	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp
12	25,8	25,7	25,7	25,7	25,7	25,9	Imp	Imp	Imp	Imp
13	26,4	26,2	26,1	26	26	26,1	26,2	26,3	26,5	26,7
14	27,2	26,9	26,7	26,6	26,5	26,5	26,6	26,6	26,8	26,9

Tabla 55. Simulación cuasiestática $\alpha=70^\circ$ tercera iteración

Tablas de resultados de la simulación cuasiestática del paso de una rampa $\alpha=90^\circ$

$\alpha = 90^\circ$					
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0	45	90	135	180
0	Imp	Imp	Imp	77	85
45	Imp	135	100	114	131
90	Imp	237	185	176	183
135	Imp	259	220	207	207
180	c	256	225	214	212

Tabla 56. Simulación cuasiestática $\alpha=90^\circ$ inicial

$\alpha = 90^\circ$									
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0	22,5	45	67,5	90	112,5	135	157,5	180
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	77	82	85
22,5	Imp	97	47	48	60	72	83	92	102
45	Imp	Imp	135	103	100	106	114	122	131
67,5	Imp	Imp	203	164	149	147	149	154	160
90	Imp	Imp	237	204	185	178	176	180	183
112,5	Imp	277	253	226	207	198	197	196	198
135	Imp	281	259	236	220	211	207	206	207
157,5	Imp	280	259	239	225	217	213	211	210
180	Imp	276	256	238	225	218	214	212	212

Tabla 57. Simulación cuasiestática $\alpha=90^\circ$ detallada

$\alpha = 90^\circ$						
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	35	40	45	50	55	60
20	49	43	41	40	41	43
22,5	58	51	47	45	45	46
25	69	59	54	51	49	50

Tabla 58. Simulación cuasiestática $\alpha=90^\circ$ primera iteración

$\alpha = 90^\circ$							
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	47	48	49	50	51	52	53
14	33,2	33,5	33,8	34	34,6	34,9	35,5
15	33,7	34	34,3	34,6	34,9	35,3	35,7
16	34,5	34,7	34,9	35,2	35,5	35,8	36,2
17	35,5	35,6	35,8	36	36,2	36,5	36,9
18	36,7	36,8	36,9	37	37,2	37,5	37,7
19	38,2	38,2	38,2	38,3	38,4	38,6	38,8

Tabla 59. Simulación cuasiestática $\alpha=90^\circ$ segunda iteración

$\alpha = 90^\circ$											
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
11	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp
12	31,4	31,3	31,3	31,3	31,4	31,5	31,7	Imp	Imp	Imp	Imp
13	32,2	31,9	31,8	31,7	31,7	31,8	31,9	32,1	32,3	32,6	32,9
14	33,2	32,9	32,6	32,5	32,4	32,4	32,5	32,6	32,7	32,9	33,2

Tabla 60. Simulación cuasiestática $\alpha=90^\circ$ tercera iteración

Tablas de resultados de la simulación dinámica del paso de un escalón $h=2r/3$ con un coeficiente de rozamiento $\mu=1$ y tracción delantera

M = 100 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,9	-
45	Imp	Imp	-	-	-	-	1,35	2,2	1,15	2,1
90	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-
135	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-
180	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 61. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=100 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=1$

M = 150 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,8	-
45	Imp	Imp	1,55	Vuelca	Vuelca	Vuelca	0,9	1,75	0,8	1,6
90	Imp	Imp	-	-	-	-	1,05	1,8	0,95	1,75
135	Imp	Imp	-	-	-	-	1	1,9	0,9	1,8
180	Imp	Imp	-	-	1,6	2,45	0,9	1,8	0,85	1,75

Tabla 62. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=150 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=1$

M = 200 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,8	-
45	Imp	Imp	0,7	Vuelca	Vuelca	Vuelca	Vuelca	Vuelca	0,75	1,6
90	Imp	Imp	-	-	0,8	1,45	0,75	1,5	0,75	1,5
135	Imp	Imp	-	-	1	1,7	0,85	1,65	0,8	1,55
180	Imp	Imp	-	-	0,9	1,6	0,8	1,55	0,75	1,5

Tabla 63. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=200 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=1$

M = 250 N·m										
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,85	-
45	Imp	Imp	0,75	Vuelca	Vuelca	Vuelca	Vuelca	Vuelca	0,75	1,85
90	Imp	Imp	0,85	1,3	0,75	1,4	0,75	1,5	0,65	1,4
135	Imp	Imp	1,2	1,7	0,7	1,4	0,7	1,45	0,65	1,4
180	Imp	Imp	1	1,55	0,7	1,4	0,65	1,4	0,65	1,4

Tabla 64. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=250 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=1$

Tablas de resultados de la simulación dinámica del paso de un escalón $h=2r/3$ con un coeficiente de rozamiento $\mu=1$ y tracción trasera

M = 100 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,85	-
45	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-
90	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-
135	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-
180	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 65. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=100$ N·m con tracción trasera y $\mu=1$

M = 150 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,65	1,35
45	Imp	Imp	0,95	Vuelca	-	-	0,8	1,5	0,75	1,5
90	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	1	1,9
135	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	1,05	2
180	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	0,85	1,85

Tabla 66. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=150$ N·m con tracción trasera y $\mu=1$

M = 200 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,6	1,2
45	Imp	Imp	0,8	Vuelca	0,75	-	0,65	1,25	0,6	1,25
90	Imp	Imp	-	-	-	-	1,05	1,75	0,65	1,4
135	Imp	Imp	-	-	-	-	0,8	1,55	0,65	1,5
180	Imp	Imp	-	-	-	-	0,7	1,5	0,65	1,45

Tabla 67. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=200$ N·m con tracción trasera y $\mu=1$

M = 250 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,5	1,05
45	Imp	Imp	0,75	Vuelca	0,65	Vuelca	0,55	1,05	0,5	1,1
90	Imp	Imp	-	-	-	-	0,7	1,3	0,55	1,2
135	Imp	Imp	-	-	-	-	0,65	1,3	0,55	1,25
180	Imp	Imp	-	-	0,75	1,4	0,55	1,25	0,55	1,25

Tabla 68. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=250 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=1$

Tablas de resultados de la simulación dinámica del paso de un escalón $h=2r/3$ con un coeficiente de rozamiento $\mu=10$ y tracción delantera

M = 100 N·m										
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,8	-
45	Imp	Imp	-	-	-	-	0,95	1,85	0,95	1,9
90	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-
135	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-
180	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 69. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=100 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=10$

M = 150 N·m										
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,7	1,35
45	Imp	Imp	-	-	0,95	1,45	0,75	1,4	0,7	1,4
90	Imp	Imp	-	-	-	-	0,85	1,6	0,75	1,55
135	Imp	Imp	-	-	-	-	0,85	1,75	0,75	1,65
180	Imp	Imp	-	-	0,95	1,75	0,75	1,65	0,75	1,6

Tabla 70. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=150 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=10$

M = 200 N·m										
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,65	1,2
45	Imp	Imp	2,3	Vuelca	0,9	1,35	0,7	1,2	0,65	1,25
90	Imp	Imp	-	-	0,75	1,3	0,65	1,3	0,65	1,3
135	Imp	Imp	-	-	0,7	1,35	0,65	1,35	0,65	1,4
180	Imp	Imp	0,85	1,45	0,65	1,35	0,65	1,4	0,65	1,35

Tabla 71. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=200 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=10$

M = 250 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,65	1,1
45	Imp	Imp	0,65	Vuelca	0,7	1,4	0,65	1,1	0,6	1,1
90	Imp	Imp	-	-	0,65	1,15	0,6	1,15	0,6	1,2
135	Imp	Imp	0,7	1,2	0,6	1,15	0,6	1,2	0,6	1,25
180	Imp	Imp	0,6	1,15	0,6	1,2	0,55	1,25	0,6	1,2

Tabla 72. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=250 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=10$

Tablas de resultados de la simulación dinámica del paso de un escalón $h=2r/3$ con un coeficiente de rozamiento $\mu=10$ y tracción trasera

M = 100 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,8	-
45	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-
90	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-
135	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-
180	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 73. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=100$ N·m con tracción trasera y $\mu=10$

M = 150 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,65	1,3
45	Imp	Imp	0,95	1,35	-	-	0,8	1,5	0,75	1,5
90	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	1	1,9
135	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	1,05	2
180	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	0,95	1,95

Tabla 74. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=150$ N·m con tracción trasera y $\mu=10$

M = 200 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,55	1,15
45	Imp	Imp	0,85	Vuelca	0,75	-	0,65	1,25	0,6	1,25
90	Imp	Imp	-	-	-	-	0,9	1,6	0,65	1,4
135	Imp	Imp	-	-	-	-	0,75	1,55	0,65	1,5
180	Imp	Imp	-	-	-	-	0,7	1,5	0,65	1,45

Tabla 75. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=200$ N·m con tracción trasera y $\mu=10$

M = 250 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,5	1
45	Imp	Imp	0,8	Vuelca	1	Vuelca	0,55	1,05	0,55	1,1
90	Imp	Imp	0,95	1,35	0,95	1,45	0,65	1,25	0,55	1,2
135	Imp	Imp	-	-	-	-	0,6	1,3	0,55	1,25
180	Imp	Imp	-	-	0,65	1,3	0,55	1,25	0,55	1,3

Tabla 76. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=250 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=10$

Tablas de resultados de la simulación dinámica del paso de un escalón $h=2r/3$ con un coeficiente de rozamiento $\mu=1.000$ y tracción delantera

M = 100 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,8	-
45	Imp	Imp	-	-	-	-	0,95	1,85	0,95	1,85
90	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-
135	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-
180	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 77. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=100$ N·m con tracción delantera y $\mu=1.000$

M = 150 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,7	1,35
45	Imp	Imp	-	-	0,9	1,45	0,75	1,4	0,7	1,4
90	Imp	Imp	-	-	-	-	0,75	1,55	0,7	1,55
135	Imp	Imp	-	-	-	-	0,8	1,65	0,75	1,65
180	Imp	Imp	-	-	0,95	1,8	0,75	1,65	0,7	1,65

Tabla 78. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=150$ N·m con tracción delantera y $\mu=1.000$

M = 200 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,65	1,15
45	Imp	Imp	2	2,45	0,85	1,3	0,65	1,2	0,65	1,2
90	Imp	Imp	-	-	0,75	1,3	0,65	1,25	0,6	1,3
135	Imp	Imp	-	-	0,7	1,35	0,65	1,35	0,6	1,35
180	Imp	Imp	0,85	1,5	0,65	1,35	0,6	1,4	0,6	1,35

Tabla 79. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=200$ N·m con tracción delantera y $\mu=1.000$

M = 250 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,65	1,1
45	Imp	Imp	Vuelca	Vuelca	0,7	1,4	0,65	1,1	0,6	1,1
90	Imp	Imp	-	-	0,65	1,1	0,6	1,15	0,55	1,15
135	Imp	Imp	0,75	1,25	0,6	1,15	0,55	1,2	0,55	1,2
180	Imp	Imp	0,6	1,15	0,55	1,15	0,55	1,2	0,55	1,2

Tabla 80. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=250 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=1.000$

Tablas de resultados de la simulación dinámica del paso de un escalón $h=2r/3$ con un coeficiente de rozamiento $\mu=1.000$ y tracción trasera

M = 100 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,8	-
45	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-
90	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-
135	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-
180	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 81. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=100 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=1.000$

M = 150 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,65	1,35
45	Imp	Imp	0,95	Vuelca	-	-	0,8	1,5	0,75	1,5
90	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	1	1,9
135	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	1,05	2
180	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	0,85	1,85

Tabla 82. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=150 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=1.000$

M = 200 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,55	1,15
45	Imp	Imp	0,85	Vuelca	0,75	-	0,65	1,25	0,6	1,25
90	Imp	Imp	-	-	-	-	0,95	1,65	0,65	1,4
135	Imp	Imp	-	-	-	-	0,8	1,55	0,65	1,45
180	Imp	Imp	-	-	-	-	0,7	1,5	0,65	1,45

Tabla 83. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=200 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=1.000$

M = 250 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,5	1
45	Imp	Imp	0,8	Vuelca	1	Vuelca	0,55	1,05	0,55	1,1
90	Imp	Imp	0,9	1,35	0,9	1,45	0,65	1,3	0,55	1,2
135	Imp	Imp	-	-	-	-	0,6	1,3	0,55	1,25
180	Imp	Imp	-	-	0,65	1,3	0,55	1,3	0,55	1,25

Tabla 84. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=250 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=1.000$

Tablas de resultados de la simulación dinámica del paso de un escalón $h=2r/3$ con un coeficiente de rozamiento $\mu=100.000$ y tracción delantera

M = 100 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,8	-
45	Imp	Imp	-	-	-	-	0,95	1,85	0,95	1,9
90	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-
135	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-
180	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	1	2,15

Tabla 85. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=100 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=100.000$

M = 150 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,7	1,35
45	Imp	Imp	-	-	0,9	1,45	0,75	1,35	0,7	1,4
90	Imp	Imp	-	-	-	-	0,8	1,55	0,7	1,55
135	Imp	Imp	-	-	-	-	0,8	1,65	0,75	1,65
180	Imp	Imp	-	-	0,9	1,75	0,75	1,65	0,75	1,65

Tabla 86. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=150 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=100.000$

M = 200 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,65	1,15
45	Imp	Imp	Vuelca	Vuelca	0,9	1,3	0,65	1,2	0,65	1,25
90	Imp	Imp	-	-	0,75	1,3	0,65	1,3	0,65	1,3
135	Imp	Imp	-	-	0,7	1,35	0,65	1,35	0,65	1,4
180	Imp	Imp	0,85	1,5	0,65	1,35	0,65	1,4	0,6	1,35

Tabla 87. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=200 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=100.000$

M = 250 N·m										
$\varphi_t \backslash \varphi_d$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,65	1,1
45	Imp	Imp	Vuelca	Vuelca	0,7	1,4	0,65	1,1	0,6	1,1
90	Imp	Imp	1,9	2,35	0,65	1,1	0,6	1,15	0,55	1,15
135	Imp	Imp	0,75	1,25	0,6	1,15	0,6	1,2	0,55	1,2
180	Imp	Imp	0,6	1,15	0,6	1,2	0,55	1,25	0,55	1,2

Tabla 88. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=250 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción delantera y $\mu=100.000$

Tablas de resultados de la simulación dinámica del paso de un escalón $h=2r/3$ con un coeficiente de rozamiento $\mu=100.000$ y tracción trasera

M = 100 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,8	-
45	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-
90	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-
135	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-
180	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 89. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=100$ N·m con tracción trasera y $\mu=100.000$

M = 150 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,65	1,35
45	Imp	Imp	0,95	Vuelca	-	-	0,8	1,5	0,75	1,5
90	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	1	1,9
135	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	1,05	2
180	Imp	Imp	-	-	-	-	-	-	0,95	1,95

Tabla 90. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=150$ N·m con tracción trasera y $\mu=100.000$

M = 200 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,55	1,15
45	Imp	Imp	0,85	Vuelca	0,75	-	0,65	1,25	0,6	1,25
90	Imp	Imp	-	-	-	-	0,95	1,65	0,65	1,4
135	Imp	Imp	-	-	-	-	0,8	1,55	0,65	1,5
180	Imp	Imp	-	-	-	-	0,7	1,5	0,65	1,45

Tabla 91. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=200$ N·m con tracción trasera y $\mu=100.000$

M = 250 N·m										
$\varphi_d \backslash \varphi_t$	0		22,5		45		67,5		90	
	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt	td	tt
0	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	Imp	0,5	1
45	Imp	Imp	0,8	Vuelca	0,7	1,25*	0,55	1,05	0,55	1,1
90	Imp	Imp	0,9	1,35	0,9	1,45	0,65	1,3	0,55	1,2
135	Imp	Imp	-	-	-	-	0,6	1,3	0,55	1,25
180	Imp	Imp	-	-	0,65	1,35	0,55	1,3	0,55	1,3

Tabla 92. Tiempo de paso en segundos (s) de cada una de las ruedas aplicando un par $M=250 \text{ N}\cdot\text{m}$ con tracción trasera y $\mu=100.000$

